

eindrapport van het afstudeerproject:

MODELLERING VAN HET SEDIMENTTRANSPORT OVER DE PLAAT VAN OSSENISSE IN DE WESTERSCHELDE

ing. C.G. ISRAËL

augustus 1997

leden afstudeercommissie:

prof. ir. K. d'Angremond

dr.ir. J. van de Graaff

ir. P.J. Visser

ir. P.G.J. Sistermans (Rijkswaterstaat dir. Zeeland)

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Kustwaterbouwkunde

VOORWOORD

Dit rapport beschrijft mijn afstudeeronderzoek naar het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse. Het onderzoek is gedeeltelijk bij de TU Delft en gedeeltelijk bij de afdeling NWL van Rijkswaterstaat dir. Zeeland verricht in de vorm van een afstudeerstage.

Dit afstudeeronderzoek is uitgevoerd ten behoeve van het project DREMPELS. Het doel van het project DREMPELS is het verkrijgen van inzicht in de processen die een rol spelen bij drempelvorming. In dit project participeren Rijkswaterstaat, TU Delft en Rijksuniversiteit Utrecht. In dit afstudeeronderzoek wordt met behulp van computermodellen een inschatting gemaakt van het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse en de gevolgen daarvan op de aanzanding van de Drempel van Hansweert. De invloed van golven op het sedimenttransport staat in dit onderzoek centraal.

Mijn dank gaat uit naar dr. ir. J. Van de Graaff, die als begeleider van de TU Delft, mij heeft voorzien van nuttige adviezen voor de uitvoering van het onderzoek en de inhoud van het rapport. Daarnaast gaat mijn dank uit naar mijn begeleider bij Rijkswaterstaat dir. Zeeland, ir. P.G.J. Sistermans, die door middel van handige programmaatjes en het geven van informatie en adviezen mij gesteund heeft in het afstudeerwerk. In het algemeen wil ik de afdeling NWL bedanken voor de hulp die ik bij het onderzoek heb gekregen en voor het ter beschikking stellen van de kostbare computercapaciteit. Tenslotte wil ik ing. B. Willemse bedanken voor het maken van enkele bijlagen voor dit rapport.

Cornelis Israël

Middelburg, augustus 1997

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	1
1. INLEIDING	2
1.1 KADER	2
1.1.1 Westerschelde	2
1.1.2 Verdieping Westerschelde	2
1.1.3 MOVE & DREMPELS	2
1.2 DOEL VAN HET ONDERZOEK	3
1.3 OPBOUW VAN HET RAPPORT	3
2. MORFOLOGIE	5
2.1 DREMPELS	5
2.1.1 Drempelvormende mechanismen	5
2.1.2 Drempel van Hansweert	7
2.2 PLAAT VAN OSSENISSE	8
2.2.1 Pointbar	8
2.2.2 Historische ontwikkeling	8
2.2.3 Luchtfoto	9
3. GETIJKLIKAAT	10
3.1 SCALDIS-100	10
3.1.1 Algemeen	10
3.1.2 Differentiaalvergelijkingen	10
3.2 STROOMBEELD	12
3.2.1 Beperkingen	12
3.2.2 1-Dimensionaal stroombeeld	12
3.2.3 2-Dimensionaal stroombeeld	12
3.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE	13
3.3.1 Ruwheidscoëfficiënt	13
3.3.2 Geïntegreerde ondiepwatervergelijkingen	14
3.3.3 Waterbeweging in punt A	14
3.3.4 Invloed Chézy-waarde	15
3.3.5 Conclusie	16
3.4 GEMETEN STROOMSNELHEDEN	16
3.4.1 De meting	16
3.4.2 Vergelijking gemeten en berekende waarden	18
3.5 EVALUATIE	19
4. GOLVEN	20
4.1 INLEIDING	20
4.2 SPECTRAAL ANALYSE	20
4.2.1 Random-phase model	20
4.2.2 Energiedichtheidspectrum	21
4.3 ENERGIEOVERDRACHT WIND-GOLF	22
4.3.1 Golfgroei-theorieën	22
4.3.2 Niet-lineaire wisselwerking	23
4.4 GOLFVOORSPELLINGSMODELLEN	24

4.4.1	Energiebalans.....	24
4.4.2	Relatie wind- en golfparameters	24
4.4.3	Golfontwikkeling op de Westerschelde	25
4.4.4	Bretscheider	26
4.5	VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE WAARDEN	28
4.5.1	Golfmetingen Middelplaat	28
4.5.2	Vergelijking meting met berekening	28
4.5.3	Evaluatie	29
5.	GOLFVOORTPLANTINGSMODEL	30
5.1	GOLFMODEL PLAAT VAN OSSENISSE	30
5.2	ONDIEPWATER EFFECTEN	30
5.2.1	Golfenergie	30
5.2.2	Shoaling	31
5.2.3	Breking	31
5.2.4	Refractie	32
5.2.5	Invloed stroming op golven	34
5.3	UITKOMSTEN GOLFVOORTPLANTINGSMODEL	35
5.3.1	Representatieve raaien	35
5.3.2	Berekende golfhoogten	36
6.	SEDIMENTTRANSPORTMODEL	38
6.1	ALGEMEEN	38
6.2	TRANSPORTMECHANISME VOOR STROMING	38
6.2.1	Bodemtransport	38
6.2.2	Zwevend transport	40
6.3	TRANSPORTMECHANISME VOOR STROMING EN GOVEN	42
6.4	SEDIMENTTRANSPORT PLAAT VAN OSSENISSE	43
6.4.1	Golfgedreven stroming	43
6.4.2	Ontbinding sedimenttransport in vectoren	43
6.4.3	Sedimenttransport raai 1	44
6.4.4	Sedimenttransport raai 2 en 3	45
6.4.5	Invloed bodemruwheid	46
6.5	INVLOED GOLVEN OP SEDIMENTTRANSPORT	46
6.5.1	Golfwerking raai 1	46
6.5.2	Golfwerking raai 2 en 3	47
6.5.3	Maximale stroming	47
6.5.4	Oostenwind	47
6.6	GROOTTE VAN DE BEREKENDE TRANSPORTEN	48
6.6.1	Bepaling jaarlijkse erosie en sedimentatie	48
6.6.2	Berekende jaarlijkse erosie en sedimentatie	48
7.	MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN	50
7.1	DIEPTEVERSCHILLEN PLAAT VAN OSSENISSE	50
7.1.1	Diepteverschilkaart 1986-1990	50
7.1.2	Profielen	50
7.2	OOSTELIJKE GEULRAND	51
7.2.1	Verdieping oostelijke geul	51
7.2.2	Sedimenttransport raai 4	51

8.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	52
8.1	SEDIMENTTRANSPORTMODEL	52
8.2	BEPERKINGEN TOEGEPASTE MODELLEN	52
8.3	MORFOLOGIE	53
8.4	AANBEVELINGEN	54

LIJST VAN FIGUREN EN BIJLAGEN

FIGUREN

figuur 1.1	Stroomschema van de toegepaste modellen.
figuur 2.1	Secundaire stroming in de geulbocht (bron: De Vries, 1994).
figuur 2.2	Eb- en vloedstroomdraden (bron: Tank, 1996a).
figuur 2.3	Verandering waterbeweging rond Plaat van Ossenissee (bron: Tank, 1996a).
figuur 3.1	Meetlocaties op de Plaat van Ossenissee (bron: Berben, 1978).
figuur 4.1	Energiedichtheidsspectrum (bron: Dalrymple & Dean, 1992).
figuur 4.2	Sheltering-effect (bron: Battjes, 1993b).
figuur 4.3	Groei van een golfspectrum (bron: Dalrymple & Dean, 1992).
figuur 4.4	Effectieve strijklengte (bron: Nortier, 1989).
figuur 4.5	Schematisatie golfontwikkeling.
figuur 5.1	Afbuiging golfstralen als gevolg van refractie (bron: Nielsen, 1993).
figuur 5.2	Schematisatie refractie boven Plaat van Ossenissee
figuur 6.1	Stroomschema toegepaste modellen.
figuur 6.2	Zwevend- en bodemtransport (bron: Van der Velden, 1995).
figuur 6.3	Invloed golven en stroming op het sedimenttransport.
figuur 6.4	golgedreven stroming.
figuur 6.5	Sedimenttransport in x-richting.
figuur I.1	Definitie golfparameters (bron: Nielsen, 1993).
figuur I.2	Orbitaalbeweging (bron: Nielsen, 1993).
figuur I.3	Horizontale orbitaalsnelheid (bron: Van der Velden, 1995).

BIJLAGEN

bijlage A	Dieptekaart Westerschelde 1996.
bijlage B1	Dieptekaart Platen van Ossenissee 1996.
bijlage B2	Westerschelde vak A (dieptelijnen en namen) 1990.
bijlage C	Historisch overzicht Platen van Ossenissee.
bijlage D1	Dieptekaart Platen van Ossenissee 1982.
bijlage D2	Dieptekaart Platen van Ossenissee 1996.
bijlage D3	Luchtfoto Plaat van Ossenissee 1996.
bijlage E1	Waterstanden en stroomsnelheden Hansweert (SCALDIS-100).
bijlage E2	Waterstanden en stroomsnelheden Plaat van Ossenissee (SCALDIS-100).
bijlage F	2-Dimensionale stroombeelden omgeving Plaat van Ossenissee (SCALDIS-100).
bijlage G1	Waterstand punt 1 debietraai.
bijlage G2	Waterstand punt 2 debietraai.
bijlage G3	Waterstand en debiet punt A.
bijlage H	Invloed bodemruwheid en waterdiepte op Chézy-factor.
bijlage I	Invloed Chézy-factor op de stroomsnelheid.
bijlage J1-3	Vergelijking gemeten (1978) en berekende waterstanden (1988) en stroomsnelheden t.p.v. Zeestelling, Landstelling en Hoge stelling.

bijlage K	Maximale golfontwikkeling bij een gegeven strijklengte en waterdiepte tijdens storm (bron: Nortier, 1989).
bijlage L	Representatieve windrichtingen (bodemprofielen).
bijlage M1	Significante golfhoogten en golfperiode bij w-z-w wind (9 Bf).
bijlage M2	Significante golfhoogten en golfperiode bij w-n-w wind (9 Bf).
bijlage M3	Significante golfhoogten en golfperiode bij o-z-o wind (8 Bf).
bijlage N	Locaties golfmetingen rond de Middelpaat t.b.v. WOV (1991).
bijlage O1-6	Gemeten gemiddelde windsnelheid, significante golfhoogte en periode t.p.v. WOV1, WOV2 en WOV3.
bijlage P1	Vergelijking gemeten golfhoogten en berekende golfhoogten t.p.v. WOV4.
bijlage P2	Vergelijking gemeten golfperioden en berekende golfperioden t.p.v. WOV4.
bijlage Q1	Bodemprofielen representatieve raaien Plaat van Ossensisse op basis van lodingsgegevens (1988).
bijlage Q2-3	Bodemprofielen representatieve raaien volgens bathymetrie SCALDIS-100.
bijlage R1	Maximale golfhoogten (t=2370) in representatieve raaien bij w-z-w wind.
bijlage R2	Golfhoogten op t=2340 in representatieve raaien bij w-z-w wind.
bijlage R3	Maximale golfhoogten (t=2370) in representatieve raaien bij o-z-o wind.
bijlage S1-3	Sedimenttransport in representatieve raaien bij w-z-w wind.
bijlage T	Resultierend sedimenttransport in raai 1 voor verschillende waarden van r.
bijlage U1-3	Invloed golven op het eb- vloed- en resulterend sedimenttransport in raai 1.
bijlage V1-3	Invloed golven op het eb- vloed- en resulterend sedimenttransport in raai 2.
bijlage W1-3	Invloed golven op het eb- vloed- en resulterend sedimenttransport in raai 3.
bijlage X1-3	Maximale eb- en vloodsnelheid in de representatieve raaien.
bijlage Y1-3	Invloed golven op het eb- vloed- en resulterend sedimenttransport in raai 1 bij o-z-o wind.
bijlage Z	Verschilkaart (1986-1990) van het gebied rond de platen van Ossensisse.
bijlage AA	Bodemprofielen representatieve raaien Plaat van Ossensisse 1986, 1990 en 1995.
bijlage AB	Stortplaatsen Westerschelde rond de platen van Ossensisse.
bijlage AC	Bodemprofiel raai 4 (evenwijdig met geul tussen Plaat van Ossensisse en Drenpel van Hansweert) op basis van lodingsgegevens.
bijlage AD	Bodemprofiel raai 4 volgens bathymetrie van SCALDIS-100
bijlage AE	Sedimenttransport in raai 4.

SAMENVATTING

Het bepalen van het sedimenttransport over de Plaat van Ossenissee is van belang om inzicht te krijgen in de processen die een rol spelen bij de aanzanding van de Drempel van Hansweert. Deze drempel ligt in de vaargeul ten oosten van de Plaat van Ossenissee.

Er is reeds een studie verricht naar drempelvormende mechanismen, maar deze hebben uitsluitend betrekking op de aan- en afvoer van sediment via de geulen. De vraag is gerezen of onder bepaalde condities, zoals springtij in combinatie met een westerstorm, de aanvoer van sediment over de Plaat van Ossenissee een significante bijdrage kan leveren aan de aanzanding van de Drempel van Hansweert. Deze condities zijn de uitgangspunten voor dit onderzoek.

Om het sedimenttransport te kunnen bepalen is het noodzakelijk om inzicht te krijgen in zowel het getijklimaat als het golfklimaat, dat boven de plaat heerst.

Aangezien er geen periodieke stroom- en golfmetingen boven de Plaat van Ossenissee zijn verricht, staat in dit onderzoek de toepassing van rekenmodellen centraal.

Voor het bepalen van de stroomsnelheden en de waterstanden boven de Plaat van is gebruik gemaakt van het waterbewegingsmodel voor de Westerschelde SCALDIS-100. Het door middel van SCALDIS-100 berekende getijklimaat dient als input voor het golfvoortplantingsmodel, dat voor dit onderzoek is ontwikkeld. Dit golfvoortplantingsmodel berekent, op basis van de lineaire golftheorie, de ontwikkeling van een karakteristieke golfcomponent boven de Plaat van Ossenissee.

Het sedimenttransportmodel, dat voor dit onderzoek is ontwikkeld, gebruikt als input de uitkomsten van SCALDIS-100 en het golfvoortplantingsmodel. Het sedimenttransportmodel is gebaseerd op de formules van Bijker.

De uitkomsten van het sedimenttransportmodel geven aan dat de invloed van de golfwerking boven de Plaat van Ossenissee op het afzonderlijke eb- en vloedtransport aanzienlijk is. Doordat de invloed van de golfwerking tijdens vloed en eb elkaar opheffen, is de invloed van de golfwerking op het resulterend sedimenttransport echter niet significant. Een mogelijke verklaring hiervoor kan liggen in het gegeven dat de waterstanden tijdens maximale ebstroom en vloedstroom ongeveer gelijk zijn, waardoor de golfwerking tijdens de maximale vloodsnelheid ongeveer hetzelfde is als tijdens de maximale ebsnelheid.

Het berekende resulterend sedimenttransport in x-richting boven de Plaat van Ossenissee heeft voor zowel het westelijke gedeelte van de plaat dat vloedgedomineerd is, als het oostelijke gedeelte dat ebgedomineerd is, een negatieve gradient. Dit duidt op sedimentatie aan zowel de west- als de oostkant van de plaat.

Het vermoeden dat er over de Plaat van Ossenissee, tijdens stormcondities, aanzienlijke hoeveelheden sediment richting Drempel van Hansweert worden getransporteerd, wordt door de uitkomsten van het sedimenttransportmodel niet onderschreven.

1. INLEIDING

1.1 KADER

1.1.1 Westerschelde

De Westerschelde is een zeearm of estuarium, gelegen in het zuidwestelijk Deltagebied. De Westerschelde vormt de verbinding tussen de rivier de Schelde en de Noordzee en is de toegangsweg tot de haven van Antwerpen.

Naast de functie als scheepvaartweg, bezit de Westerschelde ook een grote natuurwaarde. Het Land van Saeftinghe is het grootste schorgebied van Europa. De slikken en schorren in het estuarium zijn onmisbaar als fourageergebied voor vogels. De zandplaten fungeren als rustplaats voor de zeehonden die zich in het Deltagebied ophouden. Een overzicht van de Westerschelde in de vorm van een dieptekaart wordt getoond in bijlage A.

In het verleden kon de Westerschelde zich vrij ontwikkelen. Door het vastleggen van de oevers en door bagger- en stortwerkzaamheden is deze vrije ontwikkeling grotendeels teniet gedaan. De aanzanding van de verschillende drempels van de Westerschelde vormt een steeds terugkerend probleem. Drempels zijn ondiepten in de vaargeul, die een belemmering kunnen vormen voor de scheepvaart.

Om de drempels op diepte te houden is baggeren noodzakelijk. Een neveneffect van de uitgebreide baggerwerkzaamheden ten behoeve van de scheepvaart en de zandwinning is de achteruitgang van de ondiep water gebieden in het estuarium.

1.1.2 Verdieping Westerschelde

In het kader van een verdrag met België, waarbij de bereikbaarheid van de haven van Antwerpen gewaarborgd moet blijven, zal de diepte van de vaarroute in de Westerschelde vergroot worden. In 1997 is de 48'/43'-verdieping van de Westerschelde begonnen. De getallen 48 en 43 duiden op het aantal voeten, en hebben betrekking op de eisen waar aan de verdieping moet voldoen. Deze eisen zijn o.a.:

- Opvaart in één getij van een massagoedschip met diepgang 48' (14,65 m) tijdens een getijvenster van één uur per getij.
- Afvaart in één getij van een containerschip met diepgang van 43' (13 m) tijdens een getijvenster van minstens één uur per getij

De baggerwerkzaamheden, die vooral in het oosten van de Westerschelde zullen plaatsvinden zullen aanvankelijk 15 Mm³ per jaar bedragen en zich naar verwachting op de lange termijn stabiliseren op 12 tot 15 Mm³ per jaar.

1.1.3 MOVE & DREMPELS

Om de gevolgen van deze verdieping op het estuarium-systeem te kunnen monitoren en inschatten en zo nodig te kunnen ingrijpen, is in 1995 door Rijkswaterstaat Directie Zeeland, het project MOVE (MONitoring VERdieping) opgestart.

Naast het project MOVE is het project DREMPELS opgezet. Het doel van het project DREMPELS is het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van de drempel bepalen. Met de verkregen kennis kunnen de gevolgen van de beheersalternatieven beter worden ingeschat. Als het nodig is kunnen er nieuwe beheersalternatieven worden gegenereerd.

Door een beter inzicht in de morfologische processen, die in het estuarium een rol spelen, kan er gerichter gebaggerd en gestort worden, waardoor wellicht de jaarlijkse hoeveelheid baggerspecie kan worden teruggebracht en eventuele negatieve effecten van het baggeren verminderd kunnen worden.

1.2 DOEL VAN HET ONDERZOEK

O.a. door Tank (1996a) is er een studie verricht naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. In deze studie wordt een drietal mechanismen voor drempelvorming beschouwd. Deze mechanismen hebben echter uitsluitend betrekking op de aanvoer en afvoer van sediment via de geulen.

De vraag is gerezen of onder bepaalde condities, zoals springtij in combinatie met een westerstorm, de aanvoer van sediment over de Plaat van Ossensisse een significante bijdrage kan leveren voor de aanzanding van de Drempel van Hansweert.

Een overzicht van het studiegebied in de vorm van een dieptekaart en een dieptelijnenkaart met daarin de namen van geulen en platen wordt getoond in bijlage B1 en B2.

Met name voor de modellering van het sedimenttransport in de Westerschelde, dat zich nog in de ontwikkelingsfase bevindt, is het van belang om te weten of het sedimenttransport over de platen in het estuarium ook in beschouwing moet worden genomen.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op het sedimenttransport als gevolg van stroming en golfwerking boven de Plaat van Ossensisse en de invloed van dit sedimenttransport op de ontwikkeling van de Drempel van Hansweert.

Aangezien er op de platen van Ossensisse geen periodieke stroom- golf- of sedimenttransportmetingen zijn verricht, zal in dit onderzoek de toepassing van rekenmodellen centraal staan.

1.3 OPBOUW VAN HET RAPPORT

In hoofdstuk 2 wordt de morfologie van het onderzoeksgebied behandeld. De voornaamste drempelvormende mechanismen, zoals die uit de studie van Tank naar voren komen worden in het kort beschreven.

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de uitkomsten van verschillende modellen (zie fig. 1.1). Het waterbewegingsmodel SCALDIS-100 is gebruikt om de waterstanden en stroomsnelheden boven de Plaat van Ossensisse te berekenen. De achtergrond van dit model en het berekende getijklimaat boven de Plaat van Ossensisse worden behandeld in hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk wordt de ook gevoeligheid van de berekende stroomsnelheden voor de ruwheidswaarden bepaald aan de hand van een gevoeligheidsanalyse. Tenslotte wordt, op grond van snelheidsmetingen op de Plaat van Ossensisse uit het verleden, een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en de berekende snelheden.

In het onderzoek staat de invloed van golven op het sedimenttransport centraal. Hoofdstuk 4 handelt over de belangrijkste mechanismen voor golfgroei.

De golfhooften in de geulen langs de Plaat van Ossensisse zijn berekend met het programma BRET. Dit programma is gebaseerd op empirische relaties tussen golf- en windparameters, zoals

deze zijn gedefinieerd door Bretschneider. De met dit programma berekende waarden worden in hoofdstuk 4 vergeleken met golfmetingen die op de Middelpaalt zijn verricht. Op deze plaat, die ten noorden van Terneuzen ligt, zijn in tegenstelling tot de Plaat van Ossensisse wel golfmetingen verricht in verband met de aanleg van de Westerschelde oeververbinding. De modelresultaten kunnen hier getoetst worden aan de meetresultaten.

Om de golfontwikkeling boven de Plaat van Ossensisse te bepalen is voor dit onderzoek een golfvoortplantingsmodel ontwikkeld, dat gebaseerd is op de lineaire golftheorie.

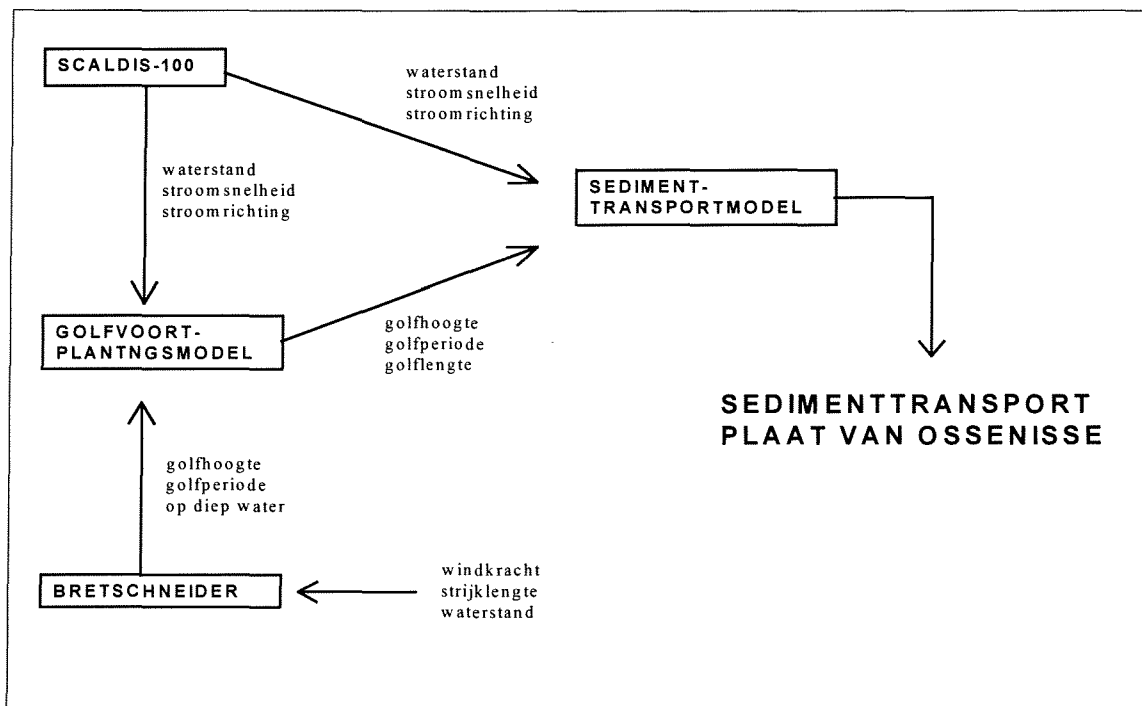
De input voor het golfvoortplantingsmodel wordt geleverd door BRET en SCALDIS-100.

De lineaire golftheorie en de wijze waarop zij is toegepast in het golfvoortplantingsmodel worden behandeld in hoofdstuk 5.

Het sedimenttransport wordt bepaald door de stroming en de golfwerking. Het sedimenttransportmodel, dat voor dit onderzoek is ontwikkeld, gebruikt daarom als input zowel de uitkomsten van SCALDIS-100 als van het golfvoortplantingsmodel. Het model is gebaseerd op de formules van Bijker. Hoofdstuk 6 handelt over de achtergronden van het sedimenttransportmodel.

In hoofdstuk 7 worden de morfologische ontwikkelingen binnen het studiegebied in de periode 1986-1990 behandeld. Aan de hand van deze ontwikkelingen is het mogelijk om de berekeningen met het sedimenttransportmodel op kwalitatieve wijze verifiëren.

Naast het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse wordt in dit hoofdstuk ook het sedimenttransport in de geul ten oosten van de plaat beschouwd. Hoofdstuk 8, tenslotte, bevat de voornaamste conclusies die in dit onderzoek naar voren zijn gekomen.



figuur 1.1 stroomschema van de toegepaste modellen

2. MORFOLOGIE

2.1 DREMPELS

2.1.1 Drempelvormende mechanismen

Drempels zijn natuurlijke ondiepten in een geul op de overgang tussen twee bochten in estuaria en meanderende rivieren. In zijn 'Literatuurstudie en Hypothesen' geeft Tank (1996a) een uiteenzetting van drie belangrijke mechanismen die het ontstaan van drempels in een estuarium veroorzaken:

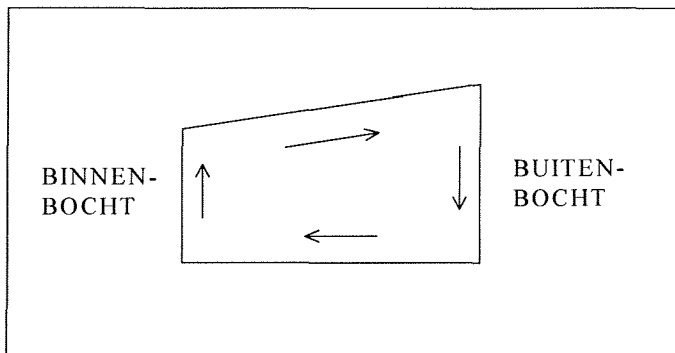
1. Doordat de secundaire stroom na een bocht afneemt verandert het dwarsprofiel van driehoekig naar rechthoekig, het rechthoekige profiel is relatief breed en ondiep en vormt de drempel.
2. In een estuarium is, in tegenstelling tot een meanderende rivier, sprake van stroomdraden voor eb en vloed. Deze stroomdraden lopen sterk uiteen ter hoogte van de drempel. Ook dit mechanisme zorgt voor een breed en ondiep dwarsprofiel.
3. De stroming in de hoofdgeul ter hoogte van de drempel divergeert als gevolg van de aftakking van nevengeulen. Ook door het brede en ondiepe dwarsprofiel van de drempel treedt divergentie op. Divergentie leidt tot vertraging van de stroomsnelheid. Dit mechanisme zorgt er voor dat het ontstaan van een drempel een zich zelf versterkend proces is.

secundaire stroming

Het eerste mechanisme dat drempelvorming veroorzaakt, is de uitdemping van de secundaire stroming aan het einde van een geulbocht. Uit de rivierkunde is bekend, dat de secundaire stroming ontstaat in een geulbocht als gevolg van de bodemwrijving (De Vries, 1996).

Door de middelpuntvliedende kracht ontstaat in de dwarsrichting van een geulbocht een waterspiegelverhang (zie fig. 2.1). De grootte van dit waterspiegelverhang is evenredig met de dieptegemiddelde stroomsnelheid in het kwadraat.

Omdat, als gevolg van de bodemwrijving, de stroomsnelheid aan de bodem lager is dan de dieptegemiddelde stroomsnelheid is het waterspiegelverhang voor die situatie feitelijk te groot. Hierdoor zal de stroomsnelheid aan de bodem een component hebben, die naar de binnenbocht is gericht. Aan het wateroppervlak is de stroomsnelheid juist hoger dan de dieptegemiddelde stroomsnelheid, waardoor er een component ontstaat die naar de buitenbocht is gericht. Dit resulteert in een spiraal- of secundaire stroming, die dwars op de hoofdstroom staat (zie fig. 2.1).



figuur 2.1 *secundaire stroming in geulbocht*

Aangezien de richting van de secundaire stroomsnelheid aan de bodem naar het centrum van de bochtstraal is gericht, zal er sprake zijn van een sedimenttransport van de buitenbocht naar de binnenbocht. Hierdoor ontstaat een driehoekig profiel.

De grootte van de secundaire stroming is evenredig met de snelheid van de hoofdstroming en omgekeerd evenredig met de straal van de geulbocht.

Door het uitdempen van de secundaire stroming na het passeren van de geulbocht zal het profiel weer een rechthoekige vorm aannemen (drempelvorming), dit gaat ten koste van de diepte in de buitenbocht.

uiteen lopen stroomdraden

Het tweede mechanisme dat drempelvorming veroorzaakt, is het uiteen liggen van stroomdraden ter plaatse van de drempel (zie fig. 2.2).

In tegenstelling tot meanderende rivieren, heerst in een estuarium een getijregime. Eb- en vloedstroomdraden liggen in de bochten dichtbij elkaar, terwijl zij elkaar op de rechte stukken sterk ontlopen. Hierdoor zijn de bochten in estuaria relatief smal en diep, en de rechte stukken relatief breed en ondiep. Ook in de Westerschelde is dit patroon zichtbaar. Hoewel de ebstroomdraad in de Westerschelde van bovenaf gezien een grotere amplitude heeft dan de vloedstroomdraad, is de golflengte waarmee de eb- en vloedstroomdraad meandert vrijwel gelijk.

divergentie hoofdstroom

Het derde mechanisme tot drempelvorming is de divergentie van de hoofdstroom. Dit leidt tot vertraging van de stroomsnelheid. Divergentie, als gevolg van het aftakken van nevengeulen, zorgt er ook voor dat de elementaire geulen niet goed op elkaar aansluiten, waardoor drempelvorming wordt veroorzaakt (Tank 1996b).

De plaats tussen twee bochten, waar de geulen samenkomen is namelijk ook de plaats de nevengeulen aftakken (zie fig. 2.2).

Als gevolg van de aftapping of juist toevoer van water door de nevengeulen kan het debiet in dit gebied aanzienlijk verspringen. Doordat het debiet bepalend is voor de meanderlengte en de bochtstraal van een geul, zullen ter plaatse van de drempel de geulen niet goed op elkaar aansluiten.

Berben (1985) heeft voor een hoofdgeul in de Westerschelde de volgende empirische relatie gevonden:

$$R = 22 \cdot 10^{-5} Q_{\max} + 1850 \quad (2.2)$$

waarin:

$$\begin{array}{llll} R & = & \text{bochtstraal} & [\text{m}] \\ Q_{\max} & = & \text{maximaal debiet tijdens een gemiddeld getij} & [\text{m}^3/\text{s}] \end{array}$$

Een groter debiet zal dus een grotere bochtstraal ten gevolg hebben.

2.1.2 Drempel van Hansweert

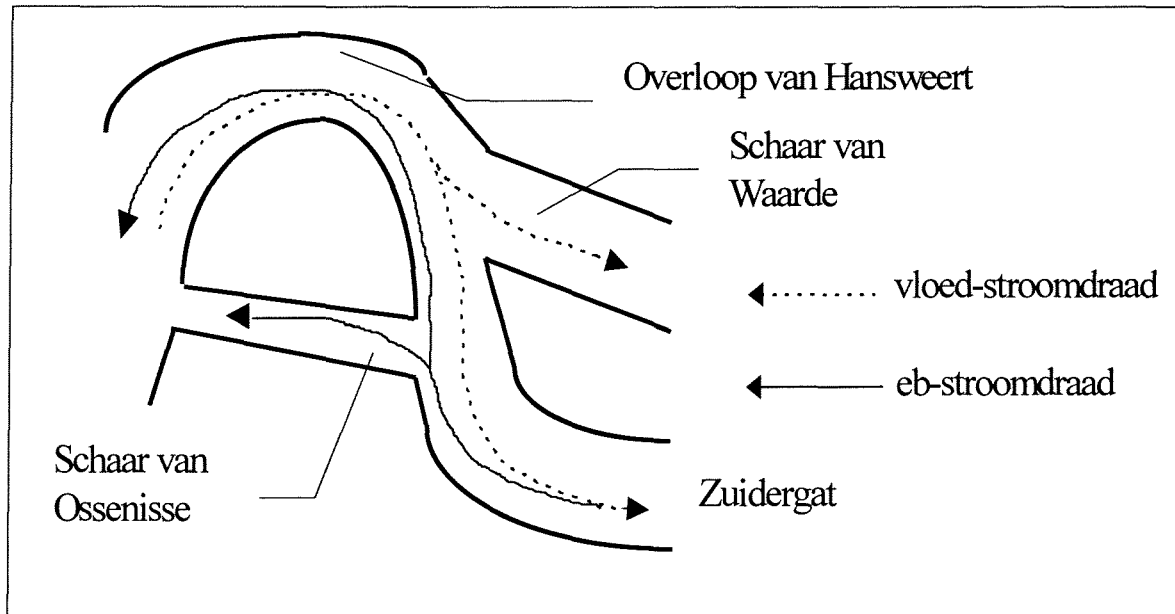
De Drempel van Hansweert is gelegen op de overgang tussen de Overloop van Hansweert en het Zuidergat, in het oostelijk gedeelte van de Westerschelde.

De vorming van de Drempel van Hansweert wordt in belangrijke mate bepaald door de in de vorige paragraaf behandelde mechanismen.

Het eerste mechanisme is in dit geval de uitdemping van de secundaire stroming in de Overloop van Hansweert op de Drempel van Hansweert tijdens vloed, en in mindere mate de uitdemping van de secundaire stroming in het Zuidergat op de Drempel van Hansweert tijdens eb.

Het tweede mechanisme is het ontlopen van de eb- en vloedstroomdraden ter plaatse van de Drempel van Hansweert.

Het derde mechanisme is het divergeren van de hoofdstroom, door de aftakking van de nevengeul Schaar van Ossenisse bij eb, en door de aftakking van de nevengeul Schaar van Waarde bij vloed.



figuur 2.2 eb- en vloedstroomdraden

2.2 PLAAT VAN OSSENISSE

2.2.1 Pointbar

De Plaat van Ossenissee, gelegen ten westen van de Drempel van Hansweert, is het onderwerp van deze studie. Hoewel er eigenlijk sprake is van de Platen van Ossenissee, die van elkaar gescheiden zijn door de Overloop van Hansweert, zal in dit verslag de term Plaat van Ossenissee gebruikt worden voor de zandplaat, die ten noorden van de Schaar van Ossenissee ligt.

De Plaat van Ossenissee is een zogenaamde 'point bar'. Deze term komt uit de rivierkunde. Point bars zijn een gevolg van het meanderen van een rivier (Ikeda et al., 1989). De aanvoer van sediment naar de point bar vindt o.a. plaats door secundaire stromingen die aan de bodem naar de binnenbocht zijn gericht.

Een kenmerk van een point bar is dat zij migreert met de migratie van de geulbocht.

2.2.2 Historische ontwikkeling

Bijlage C toont de historische ontwikkeling van de Platen van Ossenissee van 1860 tot 1973.

Bijlage D toont de meer recente ontwikkeling aan de hand van dieptekaarten uit 1982 en 1988.

De bodemligging van 1996 is op te maken uit de dieptekaart in bijlage B1.

Aangezien de bochten van de Westerschelde in de loop van de tijd zijn vastgelegd door bedijking en bestortingen, is ook de ligging van de Plaat van Ossenissee de laatste decennia min of meer stabiel.

De dieptekaarten in bijlage B1, D1 en D2 zijn gebaseerd op echolodingen, die ieder jaar plaatsvinden.

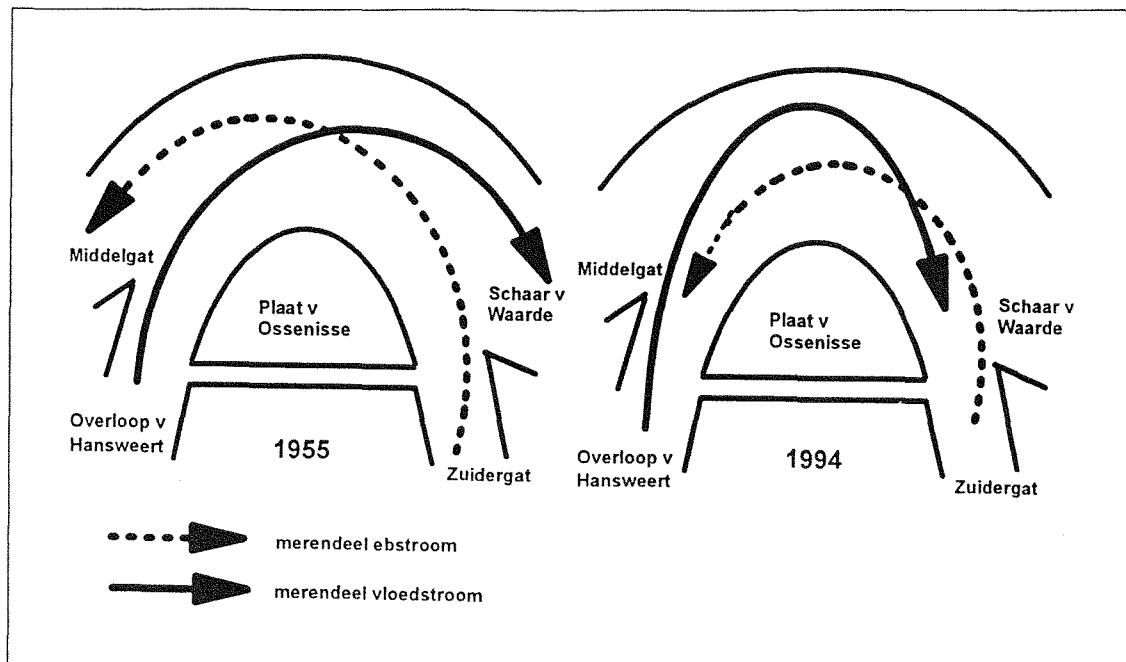
De witte vlek boven op de Plaat van Ossenissee in bijlage D2, wordt veroorzaakt door het feit dat het hoogste gedeelte van de Plaat van Ossenissee niet bereikbaar is voor meetschepen. Het hoogste gedeelte van de plaat moet door middel van waterpassingen worden opgemeten, hetgeen minder frequent gebeurt.

De laatste decennia is de Plaat van Ossenissee steeds hoger geworden. De maximale hoogteligging van de Plaat van Ossenissee bedroeg in 1996 meer dan 2 meter boven NAP.

Deze toename in hoogte, kan mogelijk verklaard worden doordat de waterbeweging in de loop van de tijd een steeds scherpere bocht is gaan maken om de Plaat van Ossenissee, waardoor de sedimenttoevoer als gevolg van de secundaire stroming is toegenomen (Tank, 1996a).

De scherpere bocht wordt veroorzaakt door twee ontwikkelingen (zie fig. 2.3):

- De Overloop van Hansweert is ten koste van het Middelgat steeds meer water gaan voeren (Van Kleef, 1994).
- Het Zuidergat is ten koste van de Schaar van Waarde steeds meer water gaan voeren als gevolg van baggerwerkzaamheden op de Drempel van Hansweert.



figuur 2.3 verandering waterbeweging rond Plaat van Ossensisse

2.2.4 Luchtfoto

Bijlage D3 toont een luchtfoto uit 1996 van de Plaat van Ossensisse. Op deze foto is zichtbaar, dat aan de westkant van de Plaat van Ossensisse sprake is van aanzienlijke ribbelvorming. Uit het ribbelpatroon valt op te maken, dat de westkant van de plaat vloedgedomineerd is. De invloed van de (vloedgedomineerde) Overloop van Hansweert is hiervan de oorzaak. De oostkant van de Plaat van Ossensisse, die een hogere ligging heeft dan de westkant, vertoont een veel gladdere structuur. Duidelijk zichtbaar is ook het geultje, dat de plaat vanuit de Schaar van Ossensisse in noordwestelijke richting doorsnijdt.

Uit bodembemonstering is gebleken dat de gemiddelde korreldiameters op de Plaat van Ossensisse variëren van 150 μm boven op de plaat tot 200 μm aan de randen.

3. GETIJKLIKAAT

3.1 SCALDIS-100

3.1.1 Algemeen

Over het getijklimaat boven de Plaat van Ossensisse is weinig bekend, vanwege het gebrek aan metingen ter plaatse. Daarom is gebruik gemaakt van rekenuitskomsten van het waterbewegingsmodel SCALDIS-100. Vanwege de hoge ligging van de Plaat van Ossensisse is met name de getijbeweging tijdens springtij van belang. Tenzij anders is vermeld, zal in dit onderzoek uitgegaan worden van de situatie tijdens springtij.

SCALDIS-100 is een 2DH-waterbewegingsmodel voor de Westerschelde. Het model maakt in het studiegebied gebruik van een rechtlijnig raster van 100 bij 100 m. Als bathymetrie is de bodem van 1988 gebruikt. Een meer recentere bodem (1996) zal binnen afzienbare tijd worden toegepast.

SCALDIS-100 gebruikt als randvoorwaarde voor de berekening van de waterbeweging tijdens springtij, een representatief springtij, dat is opgetreden op 25 november 1988.

Het model is afgeregeld voor de optredende waterstanden en stroomsnelheden op bepaalde lokaties in de geulen van de Westerschelde. Voor de stroomsnelheden over de platen is het model echter niet afgeregeld, aangezien deze van minder belang worden geacht ten opzichte van de stroomsnelheden in de geulen.

3.1.2 Differentiaalvergelijkingen

Een 2DH-waterbewegingsmodel zoals SCALDIS-100 is gebaseerd op de 2-dimensionale ondiepwatervergelijkingen. Deze vergelijkingen zijn vertikaal geïntegreerd.

Er wordt gebruik gemaakt van drie vergelijkingen; de continuïteitsvergelijking (gebaseerd op de massabalans) en twee bewegingsvergelijkingen (gebaseerd op de impulsbalans), namelijk één voor de x-richting en één voor de y-richting. De bewegingsvergelijking in de y-richting is analoog aan die in de x-richting met uitzondering van de Coriolis-term; deze verandert van teken.

continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

bewegingsvergelijking in x-richting:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(h e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x}{h} \right) \right) - \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(h e \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x}{h} \right) \right) + g h \frac{\delta(\zeta + p)}{\delta x} + f_w \frac{q q_x}{h^2} - f_c q_y = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

waarin:

ζ	waterniveau	[m]
q_x	x-component van de diepte geïntegreerde debiet	[m ² /s]
q_y	y-component van de diepte geïntegreerde debiet	[m ² /s]
$ q $	$\sqrt{(q_x^2 + q_y^2)}$	[m ² /s]
h	waterdiepte	[m]
e	viscositeit	[m ² /s]
g	zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
p	luchtdruk	[kN/m ²]
f_w	wrijvingscoëfficiënt	[s ⁻¹]
f_c	Corioliscoëfficiënt	[s ⁻¹]

De eerste drie termen uit de bewegingsvergelijking vormen de meebewegende afgeleide:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right)$$

advectiviteit

Bij de meebewegende afgeleide is de eerste term de lokale versnellingsterm. De andere twee termen zijn advectione versnellingstermen. Deze spelen een rol als er sprake is van relatief grote stroomversnellingen over een beperkte afstand, zoals die kunnen optreden in een rivier.

Voor een getijsimulatie in een zeearm als de Westerschelde zullen de advectione termen een minder belangrijke rol spelen, aangezien grootte van de stroomversnellingen beperkt blijft.

viscositeit

De viscositeit speelt een rol bij de voortplanting van de getijgolf. Een hoge viscositeit veroorzaakt een afname van de amplitude van de getijgolf en een verlaging van de voortplantingssnelheid van de getijgolf. Een afname van de amplitude van de getijgolf leidt tot lagere stroomsnelheden.

wrijving

De wrijving in het model wordt bepaald door de wrijvingscoëfficiënt. Uitgedrukt in de ruwheidscoëfficiënt van Chezy geeft dit:

$$f_w = g/C^2 \quad (3.3)$$

Omdat vergroting van de wrijving leidt tot een grotere energiedissipatie, zal de amplitude van de getijgolf afnemen. Tevens zal een grotere wrijving een verlaging van de voortplantingssnelheid tot gevolg hebben.

Voor het model SCALDIS-100 wordt niet de ruwheidscoëfficiënt van Chezy maar van Manning toegepast. In het model wordt de Westerschelde in vier delen opgesplitst, elk met een eigen ruwheidswaarde.

3.2 STROOMBEELD

3.2.1 Beperkingen

Door middel van GIS-macro's LEESSCALDIS en STROOMBEELD, die zijn ontwikkeld door de afdeling NWL van RWS dir. Zeeland, is het mogelijk om met ARC-INFO de uitkomsten van een rekensessie van SCALDIS-100 te presenteren als respectievelijk 1-dimensionaal en 2-dimensionaal stroombeeld.

Via een applicatie, bestaat de mogelijkheid om met SCALDIS-100 ook de afstroming van de platen tijdens eb en de toestroming tijdens vloed te simuleren. Hierdoor kunnen de snelheidspieken, die in deze situaties kunnen optreden, in rekening worden gebracht. De uitkomsten van SCALDIS-100, waar LEESSCALDIS en STROOMBEELD gebruik van maken, zijn berekend zonder toepassing van de hierboven genoemde applicatie. Daarnaast zijn alleen stroomgegevens beschikbaar voor spring- en doottij. Deze laatste beperking is minder van belang, aangezien het sedimenttransport tijdens springtij in dit onderzoek centraal staat.

3.2.2 1-Dimensionaal stroombeeld

Bijlage E1 toont de berekende waterstanden en stroomsnelheden in de Overloop van Hansweert, ter plaatste van Hansweert. Op de x-as is de tijd uitgezet in minuten, die verstreken is sinds het begin van de simulatie.

Bijlage E2 toont het getijklimaat boven het hogere gedeelte van de Plaat van Ossensisse. Voor de positie van de vermelde coördinaten wordt verwezen naar bijlage D2. Hierbij moet worden opgemerkt, dat bij het droogvallen van de plaat de waterstand in de grafiek gehandhaafd blijft op plaathoogte (NAP +1.5m). De waterdiepte is in dit geval gelijk aan nul.

De afwezigheid van de snelheidskarakteristiek voor af- en toestroming blijkt in de bijlage E2 door het sinusvormige karakter van de snelheidskromme, waarin snelheidspieken ontbreken. In tegenstelling tot de stroomsnelheid in Overloop van Hansweert (bijlage E1), treden de maximale eb- en vloodsnelheden boven de Plaat van Ossensisse betrekkelijk snel na elkaar op, namelijk na iets meer dan anderhalf uur. De verklaring hiervoor is de korte periode dat de plaat onder water staat (3 uur 40 min).

Merk op dat de maximale eb- en vloodsnelheid optreden bij nagenoeg dezelfde waterstand van NAP +2.7m.

3.2.3 2-Dimensionaal stroombeeld

Door middel van stroomvectoren is het mogelijk om een 2-dimensionaal beeld te geven van de met SCALDIS-100 berekende stroomrichtingen en snelheden.

Bijlage F toont de stroombeelden tijdens springtij gedurende een gehele getijperiode, met intervallen van 30 minuten. De dieptelijnen van NAP -5m en NAP -10m zijn in de bijlage toegevoegd.

vloed

Van t=2100 min tot t=2280 min trekt de vloedstroom in de Overloop van Hansweert sterk door. De Schaar van Ossensisse fungeert als een kortsluitgeul tussen de Overloop van Hansweert en het Zuidergat. Het geultje, dat vanuit de Schaar van Ossensisse in noordwestelijke richting de Plaat van Ossensisse doorsnijdt, fungeert als een kleine vloodschaar.

Van t=2280 min tot t=2370 min vindt toestroming plaats over de Plaat van Ossensisse.

Op $t=2340$ min is zichtbaar dat toestroming plaatsvindt naar het hoogste (noordoostelijke) gedeelte van de plaat vanuit verschillende richtingen. De maximale vloedstroom treedt op als $t = 2370$ min.

eb

Van $t=2430$ min tot $t=2700$ min trekt de ebstroom over de Plaat van Ossenis. Merk op dat er op $t=2430$ min nog steeds sprake is van een vloedstroom in de Overloop van Hansweert, terwijl er over de Plaat van Ossenis al afstroming plaatsvindt. Dit verschijnsel kan waarschijnlijk worden toegeschreven aan traagheidseffecten.

Door de hoge ligging treedt de maximale ebstroom boven de plaat op als $t = 2460$ min. De Schaar van Ossenis fungeert weer als kortsluitgeul. Hier treden snelheden op van meer dan 1,5 m/s.

Vanaf $t=2490$ min begint de ebstroom door de hoofdgeulen goed door te trekken. De stroming over de Plaat van Ossenis is dan al aan het afnemen vanwege de afnemende waterdiepte boven de plaat.

3.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE

3.3.1 Ruwheidscoëfficiënt

De bodemruwheid wordt in SCALDIS-100 in rekening gebracht door de Westerschelde op te splitsen in 4 delen met elk één bepaalde Manning-waarde.

Het gebruik van één Manning-waarde voor zowel platen als geulen binnen een bepaald gebied van de Westerschelde, heeft invloed op de betrouwbaarheid van de stroomsnelheden boven de platen. De Manningwaarde is namelijk representatief voor de geulen binnen het gebied. Het waterbewegingsmodel is, zoals vermeld in §3.1.1, afgeregeld aan de hand van meetgegevens in de geulen. Daarom is een gevoeligheidsanalyse, die de invloed van de ruwheidscoëfficiënt op de stroomsnelheid bepaalt, noodzakelijk om de met SCALDIS-100 berekende snelheden op de juiste waarde te schatten.

De bodemruwheid kan ook uitgedrukt worden via de Chézy-coëfficiënt. Voor de ruwheidscoëfficiënt van Chézy geldt:

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{r} \right) \quad (3.4)$$

waarin:

C	=	Chézy-coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
h	=	waterdiepte	[m]
r	=	bodemruwheid	[m]

Uit de rivierkunde komen de volgende relaties:

$$U = C \sqrt{Ri} \quad (3.5)$$

$$U = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \quad (3.6)$$

waarin:

U	=	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
C	=	Chézy-coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
n	=	Manning-waarde	[s/m ^{1/3}]
R	=	hydraulische straal	[m ²]
i	=	bodemverhang	[-]

Dit levert de volgende relatie op tussen de Chézy-coëfficiënt en de Manning-waarde:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (3.7)$$

In geval van een brede rivier ($R \approx h$) reduceert vergelijking 3.7 tot:

$$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}} \quad (3.8)$$

3.3.2 Geïntegreerde ondiepwatervergelijkingen

Voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse is gekozen voor een vereenvoudiging van de ondiepwatervergelijkingen waarmee SCALDIS-100 rekent (vgl. 3.1 en 3.2). Dit resulteert in de 1-dimensionale continuïteitsvergelijking en de vereenvoudigde 1-dimensionale bewegingsvergelijking (Verspuy, 1991):

continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

bewegingsvergelijking:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial(\zeta)}{\partial x} + \frac{g}{C^2} \frac{|q| q}{h^2} = 0 \quad (3.10)$$

Als ruwheidscoëfficiënt in de bewegingsvergelijking wordt de Chézy-coëfficiënt gebruikt. Door substitutie van de continuïteitsvergelijking in de bewegingsvergelijking en uitgaande van $\delta h / \delta x = 0$, wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = - \frac{1}{gh} \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{1}{C^2 h^3} q |q| + \frac{2}{g h^2} q \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3.11)$$

Integratie in x-richting geeft de volgende formule:

$$h_2 - h_1 = - \frac{1}{gh} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_g \Delta x - \frac{1}{C^2 h^3} q_g |q_g| \Delta x + \frac{2}{g h^2} q_g \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} \right)_g \Delta x \quad (3.12)$$

Het onderschrift g in vergelijking 3.12 duidt op gemiddeld, en is van toepassing voor een punt halverwege $x=1$ en $x=2$.

De positieve x -richting is gelijk aan de stroomrichting, dus in geval van ebstroom over de Plaat van Ossensisse ligt $x=1$ ten oosten van $x=2$.

3.3.3 Waterbeweging in punt A

Voor de uitvoering van de gevoeligheidsanalyse is gekozen voor de raai in x -richting met y -coördinaat 382000 op het tijdstip $t=2460$ min (zie bijlage F, $t=2460$ min), omdat tijdens maximale ebstroom de stroomrichting over de Plaat van Ossensisse ongeveer evenwijdig loopt met de x -as.

Aangezien op $t=2460$ min de ebstroming maximaal is, is $\delta q/\delta t$ gelijk aan nul, hierdoor vervalt de eerste term in het linkerlid van vergelijking 3.12.

De waarden voor de overige parameters in vergelijking 3.12 volgen uit een berekening van SCALDIS-100 en zijn te zien in tabel 3.1. De waarden uit deze tabel zijn af te leiden uit bijlage G1-3.

Bijlage G1 en G2 tonen de berekende waterstanden in respectievelijk punt 1 en punt 2.

Punt 1 ligt op $x=59250$ en punt 2 op $x=57000$. Dit geeft een Δx van 2250 m. Het verschil in waterstand op $t=2460$ min tussen punt 1 en punt 2 bedraagt 0.21 m.

Bijlage G3 toont de berekende waterstand en het debiet in het punt A ($x=58000$), dat ongeveer halverwege punt 1 en 2 ligt. Punt A heeft een bodemdiepte van NAP -0.8m. De waterstand op $t=2460$ min in punt A bedraagt NAP +2,42m. De waterdiepte is gelijk aan de waterstand minus de bodemdiepte en bedraagt 3,24 m

De term $\delta \zeta/\delta t$ in vergelijking 3.12 stelt de richtingscoëfficiënt voor van de raaklijn aan de waterstandskromme van punt A op $t=2460$ min (zie bijlage G3). Deze richtingscoëfficiënt bedraagt $-1,92E-4$ m/s.

Het maximale ebdebiet in punt A is $2,42 \text{ m}^3/\text{s}$ per m' .

Parameter	waarde	
h_1-h_2	0,21	m
h_A	3,24	m
$\delta q/\delta t$	0	m^2/s^2
Δx	2250	m
q_A	2,42	m^2/s
$\delta \zeta/\delta t$	-1,92E-4	m/s

tabel 3.1 gebruikte parameterwaarden

3.3.4 Invloed Chézy-waarde

Als de waarden uit tabel 3.1 worden ingevoerd in vergelijking 3.12 resulteert dit in een Chézy-waarde van $41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Uitgaande van de vereenvoudigde ondiepwatervergelijkingen, is dit de Chézy-waarde, die gebruikt wordt voor de snelheidsberekening boven de Plaat van Ossensisse. Zoals eerder opgemerkt is de ruwheidswaarde waarmee SCALDIS-100 rekent afgeregeld voor de (diepe) geulen. Het is daarom onwaarschijnlijk dat boven de platen ook dezelfde ruwheidswaarde geldt.

Uit vergelijking 3.4 blijkt dat de Chézy-coëfficiënt afhankelijk is van de waterdiepte en de bodemruwheid (zie bijlage H). De vraag is, welke Chézy-waarde er in punt A op de Plaat van

Ossenisse verwacht mag worden. Doordat de waterdiepte tijdens maximale ebsnelheid in punt A bekend is (3,24 m), varieert de Chézy-waarde alleen met de bodemruwheid r .

Voor een vlak stroombed is r gelijk aan 2 à 3 maal D_{90} . Voor de Westerschelde is echter niet de korrelgrootte maar de ribbelhoogte bepalend voor de waarde van r .

Voor de ribbelhoogte op de Plaat van Ossenis is een waarde van 3 cm aangenomen (zie §6.4.5). Dit geeft een Chézy-waarde in punt A van $56 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Deze waarde is hoger dan de waarde van $41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ die volgt uit vergelijking 3.12.

Door de invloed van de golfwerking aan de bodem kan de ribbelhoogte toenemen. Dit heeft een afname van de Chézy-waarde tot gevolg. De mate van deze afname is moeilijk te bepalen, zodat niet precies gezegd kan worden welke Chézy-waarde voor de Plaat van Ossenis aannemelijk is.

Bijlage I toont de gevoeligheid van de stroomsnelheid in punt A voor de keuze van de Chézy-waarde. Voor de gevoeligheidsanalyse is weer gebruik gemaakt van de vereenvoudigde ondiepwatervergelijking (vgl. 3.12). Een bepaalde Chézy-waarde is samen met de waarden uit tabel 3.1 (uitgezonderd de waarde voor het debiet q_A) ingevoerd in vergelijking 3.12. Op deze wijze kan het debiet in punt A berekend worden, dat behoort bij een bepaalde Chézy-waarde. De bijbehorende stroomsnelheid is gelijk aan q_A/h .

Uit deze bijlage blijkt, dat er sprake is van een lineair verband tussen de stroomsnelheid en de Chézy-waarde. Een kleinere Chézy-waarde als gevolg van golfwerking aan de bodem resulteert in een lagere stroomsnelheid.

3.3.5 Conclusie

SCALDIS-100 gebruikt voor zowel de geulen als de platen dezelfde ruwheidswaarde. Deze ruwheidswaarde is alleen afgeregeld voor de geulen en niet voor de platen. Dit heeft tot gevolg dat de werkelijke ruwheidswaarde op de Plaat van Ossenis significant kan afwijken van de ruwheidswaarde waarmee SCALDIS-100 rekt. Dit wordt veroorzaakt door de geringe waterdiepte boven de plaat, de afwijkende ribbelhoogte en de invloed van de golfwerking aan de bodem.

Uit bijlage I blijkt dat de berekende stroomsnelheid boven de plaat gevoelig is voor de keuze van de ruwheidswaarde. Concluderend kan daarom gesteld worden dat de stroomsnelheden boven de platen in de Westerschelde, afhankelijk van de mate van golfwerking, significant kunnen afwijken van de berekende snelheden met SCALDIS-100.

Omdat uit de volgende paragraaf zal blijken dat de met SCALDIS-100 berekende snelheden redelijk overeenkomen met snelheden die in het verleden op de Plaat van Ossenis gemeten zijn, zal voor dit onderzoek toch gebruik worden gemaakt van de met SCALDIS-100 berekende snelheden boven de Plaat van Ossenis.

3.4 GEMETEN STROOMSNELHEDEN

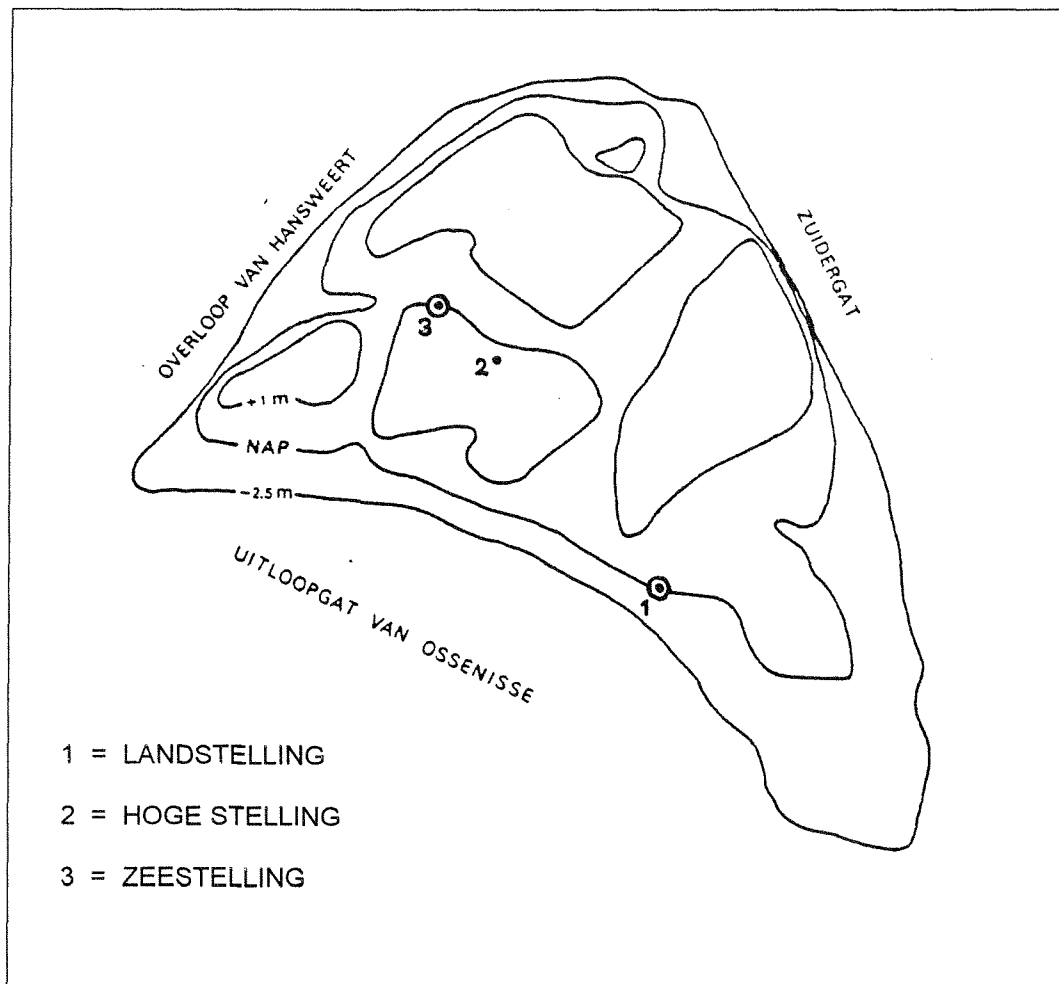
3.4.1 De meting

Om de door SCALDIS-100 berekende snelheden boven de Plaat van Ossenis te toetsen aan de werkelijkheid wordt in deze paragraaf een vergelijking gemaakt met gemeten snelheden.

Op de plaat van Ossenis zijn namelijk metingen verricht in het kader van een onderzoek naar optredende bodemvormen in relatie tot de waterbeweging boven de plaat.

Dit onderzoek vond plaats in 1976 door de Rijksuniversiteit Utrecht, vakgroep fysische geografie, onder leiding van Terwindt. De metingen zijn verricht op drie specifieke locaties, die respectievelijk zeestelling (NAP +0.5m), hoge stelling (NAP +1.5m) en landstelling (NAP - 0.5m) worden genoemd. De locaties van deze stellingen zijn te zien in figuur 3.1.

Aangezien de meting plaatsvond in 1976 en SCALDIS-100 rekt met de bodem van 1988, verschilt de bodemligging van de Plaat van Ossensisse uit figuur 3.1 met de bodemligging van 1988 (bijlage D2).



figuur 3.1 meetlocaties op de Plaat van Ossensisse

De stroomsnelheden zijn gemeten met twee typen schoepstroommeters, namelijk de Ott-molen en de wadstroommeter. Op de land- en zeestelling is gebruik gemaakt van zes Ott-molens in de meetverticaal. Op deze wijze wordt een betrouwbaar beeld verkregen van de stroomsnelheidsverdeling. Daarnaast is ter controle een wadstroommeter toegepast. Dit meetinstrument verricht metingen op één vaste hoogte t.o.v. NAP, waarbij zowel de stroomsnelheid als de stroomrichting automatisch worden vastgelegd, met een tijdsinterval van 10 min.

Ter plaatse van de hoge stelling (NAP +1.5m) is vanwege de geringe waterdiepte volstaan met een wadstroommeter.

3.4.2 Vergelijking gemeten en berekende waarden

Voor een vergelijking van de uitkomsten van de metingen en de berekeningen met SCALDIS-100 wordt verwezen naar bijlage J. De locaties van de berekende stroomsnelheden en waterdiepten zijn ongeveer op dezelfde plaats gesitueerd als de meetstellingen.

Aangezien de bodemligging Plaat van Ossensisse in de periode 1976-1988 een verandering heeft ondergaan, zijn deze locaties niet op precies dezelfde plaats gekozen als de meetstellingen. Er is gekozen voor locaties met dezelfde hoogte, die zo dicht mogelijk bij de coördinaten van de meetstellingen in de buurt liggen. De metingen die tijdens springtij zijn verricht zijn vergeleken met de berekeningen volgens SCALDIS-100 tijdens springtij. Om de gemeten en de berekende waarden met elkaar te vergelijken zijn in bijlage J de berekende waterstanden en de gemeten waterstanden 'op elkaar gelegd'.

landstelling

Uit bijlage J1 blijkt, dat de gemeten en de berekende waterdiepten redelijk overeenkomen.

De gemeten vloedsnelheden ter plaatse van de landstelling komen goed overeen met de berekende waarden. De berekende maximale ebsnelheid ter plaatse van de landstelling komt echter 25% hoger uit dan de gemeten waarde.

zeestelling

Bij de gemeten vloedsnelheden ter plaatse van de zeestelling is de invloed te zien van de in de nabijheid liggende vloedgeultje. De stroomsnelheid in deze geul neemt na verloop van tijd af en ter plaatse van de zeestelling gaat de oostelijk gerichte vloedstroom die over de plaat trekt overheersen. Dit veroorzaakt de tweede piek in de vloedsnelheid.

Het vloedgeultje, dat in 1976 nog in de nabijheid van de zeestelling lag, is in 1988 verdwenen, zodat de berekende snelheid er niet meer door beïnvloed wordt.

Het verloop van de ebsnelheid komt beter overeen, waarbij de berekende maximale ebsnelheid 20 % hoger uitkomt dan de gemeten snelheid.

hoge stelling

De maximaal gemeten vloedsnelheid wordt vrijwel onmiddellijk na het onderlopen van de plaat bereikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat ook de invloed van de meetopstelling een rol speelt. De gemeten stroomsnelheden tijdens lage waterstand kunnen afwijken van de werkelijk opgetreden gemiddelde stroomsnelheden. Deze afwijking kan ontstaan door de vaste positie van de wadstroommeter. Als deze niet op de representatieve hoogte van 0,4 keer de waterdiepte staat, kan er bij een lage waterstand een te hoge dieptegemiddelde snelheid worden gemeten. De gemeten ebsnelheden ter plaatse van de hoge stelling komen redelijk overeen met de berekende waarden. De berekende maximale ebsnelheid is nauwelijks groter dan de gemeten waarde.

3.5 EVALUATIE

Op basis van de resultaten van drie meetopstellingen is het moeilijk om het totale berekende stroombeeld boven de Plaat van Ossensisse te beoordelen. Voorzichtig kan geconcludeerd worden dat de maximaal optredende stroomsnelheden redelijk overeenkomen met de gemeten waarden. Deze stroomsnelheden zijn van groot belang voor het sedimenttransport.

De berekende maximale ebsnelheden lijken iets hoger te zijn dan de gemeten waarden. De berekende maximaal optredende vloedsnelheid treedt, afhankelijk van de locatie van het meetpunt, later op dan de gemeten maximale stroomsnelheid.

Mogelijke onnauwkeurigheden als gevolg van de meetopstelling zorgen ervoor dat de vergelijking tussen de gemeten en berekende waarden met de nodige voorzichtigheid moet worden bekeken, zeker wat betreft de hoge stelling.

In de periode van 1976 tot 1988 is de hoogteligging van de plaat veranderd. Dit geldt ook voor de ligging van de geulen die de plaat doorsnijden. Als gevolg hiervan, kan een ander stroombeeld ontstaan. Dit ondanks het feit dat de locaties voor de berekende waarden qua hoogteligging overeenstemmen met de meetopstellingen. Dit speelt vooral een rol bij de zeestelling.

4. GOLVEN

4.1 INLEIDING

In het vorige hoofdstuk is het getijklimaat boven de Plaat van Ossensisse beschreven. Naast het getijklimaat is het ook van belang om het golfklimaat boven de Plaat van Ossensisse te bepalen. Aangezien er geen resultaten van golfmetingen op de Plaat van Ossensisse beschikbaar zijn, moet het golfklimaat worden bepaald aan de hand van rekenmodellen.

Hoofdstuk 5 handelt over het model dat de golfvoortplanting boven de Plaat van Ossensisse berekent. Als input voor dit model gelden de significante golfhoogten en perioden in de geul langs de Plaat van Ossensisse voor verschillende windrichtingen en snelheden.

Deze golfhoogten en perioden zijn berekend met het programma BRET, dat is ontwikkeld door de Dienst Weg en Waterbouw. BRET is gebaseerd op empirische relaties tussen golf- en windparameters, zoals deze zijn bepaald door Brettschneider. De achtergrond van deze empirische relaties en de uitkomsten van het programma BRET worden beschreven in §4.4.

De paragrafen 4.2. en 4.3 geven achtergrond informatie over het verschijnsel windgolven. §4.2 handelt over de manier waarop windgolven kunnen worden beschreven. In §4.3 worden theorieën beschreven die handelen over de overdracht van energie van een windveld naar een golfveld.

4.2 SPECTRAAL-ANALYSE

4.2.1 Random-phase-model

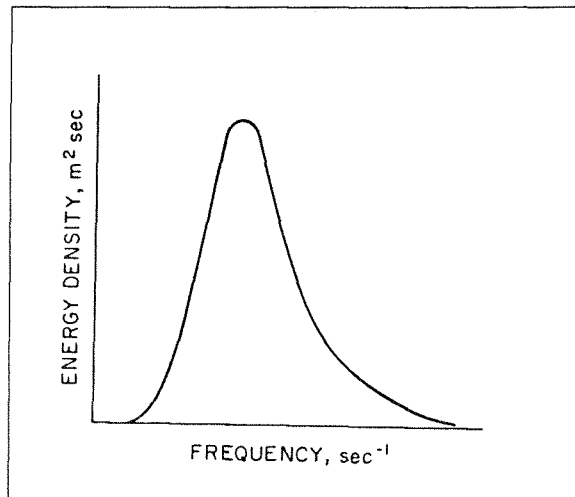
Door middel van de spectraal-analyse kunnen windgolven beschreven worden. In de spectraal analyse worden windgolven beschouwd als een superpositie van lopende, sinusvormige golven met verschillende amplituden, frekwenties, richtingen en fasen; de zogenaamde spectrale golfcomponenten. Analytisch uitgedrukt, ziet het één-dimensionale model (ruimtelijk gezien) voor windgolven er als volgt uit:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (4.1)$$

$\eta(t)$	=	uitwijking wateroppervlak	[m]
a	=	amplitude	[m]
f	=	frequentie	[Hz]
α	=	fase	[rad]

Dit model wordt wel het random phase-model genoemd, omdat de fase α een uniform verdeelde kansdichtheid heeft op het interval $(-\pi, \pi)$. Dit houdt in dat de fase onafhankelijk is van de frequentie van een bepaalde golfcomponent, in tegenstelling tot de amplitude. Door dit verschijnsel is volgroeide zeegang een stationair verschijnsel, d.w.z. onafhankelijk van de tijd. Dit is het wezenlijk verschil tussen windgolven en getijgolven.

Uitgaande van het random phase-model, kan er een energiespectrum worden gegenereerd voor een bepaald golfveld. Figuur 4.1 toont zo'n energiedichtheidspectrum.



figuur 4.1 energiedichtheidspectrum

4.2.2 Energiedichtheidspectrum

Het oppervlak van het energiedichtheidspectrum is gelijk aan de som van de energiebijdragen van de frequentie-intervallen:

$$E(f) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2} a_i^2 \quad (4.2)$$

De golfenergie per m^2 is namelijk rechtevenredig met de golfhoogte in het kwadraat.

De piekfrequentie f_p is de frequentie waar het spectrum de maximale energie heeft. Deze piekfrequentie kan worden beschouwd als de 'drager' van de totale energie van het spectrum. De groepsnelheid van de golfcomponent met de piekfrequentie is namelijk ongeveer gelijk aan de snelheid waarmee de totale golfenergie zich voortplant. Aangezien f gelijk is aan $1/T$, waarbij T de golfperiode voorstelt, geldt voor de piekperiode:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (4.3)$$

Voor de significante golfperiode geldt de volgende relatie:

$$T_s \approx 0.9 T_p \quad (4.4)$$

Naast de significante golfperiode heeft een golfveld ook een significante golfhoogte H_s . H_s is te definiëren als de gemiddelde hoogte van de 1/3 hoogste golven. H_s blijkt overeen te komen met de golfhoogte, die bij een visuele waarneming als de representatieve golfhoogte van een golfveld wordt geschat.

Uit het energiespectrum kan H_s als volgt worden gevonden:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (4.5)$$

Hierbij is m_0 gelijk aan het oppervlak van energiespectrum.

De significante golfperiode, significante golfhoogte en de voortplantingsrichting worden als karakteristiek beschouwd voor een bepaald windgolfveld.

4.3 ENERGIEOVERDRACHT WIND-GOLF

4.3.1 Golfgroei-theorieën

De energie die windgolven bevatten is overgedragen door een windveld. Bij de overdracht van energie van een windveld naar het wateroppervlak, is de invloed van de schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent te verwaarlozen.

De belangrijkste bijdrage is afkomstig van luchtdrukfluctuaties in het windveld.

Phillips

Uitgaande van de situatie waarbij de golven het windveld nog niet verstoren, kan de theorie van Phillips (1957) worden toegepast. Deze veronderstelt dat luchtdrukfluctuaties met de gemiddelde windsnelheid getransporteerd worden. Bij een bepaalde windsnelheid zal één drukgolfcomponent uit het windveld in fase blijven met een opgewekt watergolfcomponent, zodat er een constante toevoer van energie plaatsvindt. Dit wordt het resonantiemechanisme van Phillips genoemd.

Door fluctuaties in de windsnelheid zal de energieoverdracht niet beperkt blijven tot één golfcomponent met een bepaalde frequentie, maar tot meerdere golfcomponenten, die binnen een bepaald frequentiegebied liggen. Dit frequentiegebied zal aan de hoogfrequente zijde van het energiespectrum liggen.

Tussen de golfenergie en de golfhoogte bestaat de volgende relatie:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.6)$$

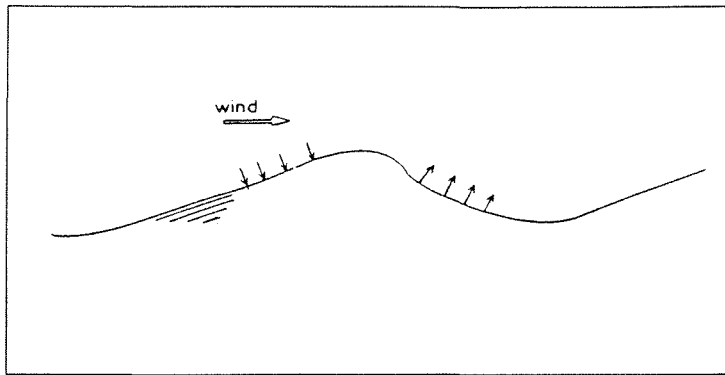
E	=	energiedichtheid per golfoppervlak	[J/m ²]
ρ	=	dichtheid zeewater	[kg/m ³]
H	=	golfhoogte	[m]

Miles

Aangezien volgens Phillips de energieoverdracht constant is in de tijd, zal de toename van de golfhoogte evenredig zijn met de wortel uit de tijd. Bij het toenemen van de golfhoogte zal het wateroppervlak verstoringen teweegbrengen in het winddrukpatroon. Miles (1957) heeft voor deze situatie een theorie ontwikkeld.

Aan de loefzijde van de golftop ontstaat overdruk, waardoor de energie wordt overgedragen van het windveld naar de golfcomponent. Dit verschijnsel heet 'sheltering' (zie fig. 4.2).

De energieoverdracht neemt toe, naarmate de golfhoogte groter wordt, en blijkt evenredig te zijn met de aanwezige golfenergiedichtheid. Dit verschijnsel zorgt daardoor voor een exponentiële toename van de golfenergie in de tijd.



Figuur 4.2 sheltering-effect

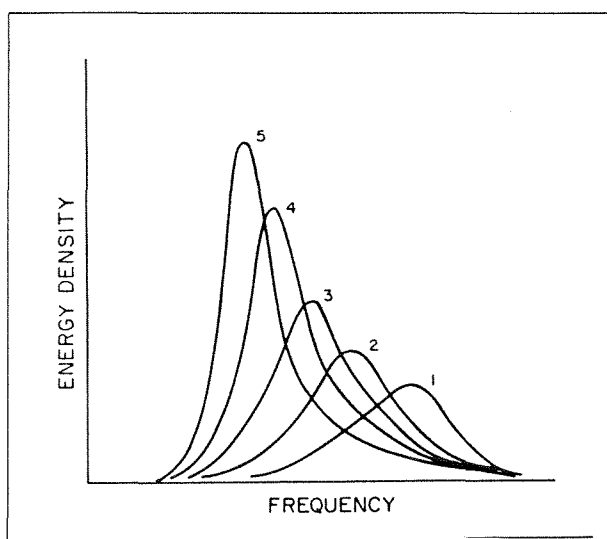
4.3.2 Niet-lineaire wisselwerking

Als de beschouwde golfcomponent een zekere steilheid heeft bereikt ($H/L > 1/7$) zal de golf gaan breken, dit is het zogenaamde kuiven van de golf. Vanaf dit moment is de energietoevoer van het windveld naar de golfcomponent even groot als de energieafdracht als gevolg van dissipatie door breking en door niet-lineaire wisselwerking. Deze niet-lineaire wisselwerking zorgt ervoor dat er uitwisseling van energie plaatsvindt tussen de verschillende golfcomponenten.

Zoals eerder vermeld vindt de energieoverdracht van wind naar golven voornamelijk plaats in het hoogfrequente gebied. Als de golfcomponenten in dit gebied volgroeid zijn, vindt er een uitwisseling van energie plaats naar de lagere frequenties.

Aangezien golfcomponenten met een lagere frequentie een grotere golflengte hebben (dispersierelatie), kunnen ze bij dezelfde steilheid een grotere golfhoogte krijgen. Deze golfcomponenten krijgen hun energie dus niet rechtstreeks via het windveld toegediend, maar via de golfcomponenten met een hogere frequentie.

Figuur 4.3 toont de groei van een energiespectrum als gevolg van de niet-lineaire wisselwerking. Als een windveld lang genoeg blijft bestaan, zal een volledig ontwikkelde zeegang ontstaan.



figuur 4.3 groei van een golfspectrum

4.4 GOLFVOORSPELLINGSMODELLEN

4.4.1 Energiebalans

Voor het nauwkeurig voorspellen van golven kan gebruik worden gemaakt van modellen die gebaseerd zijn op de Eulerse balans. Hierbij wordt het beschouwde zeegebied opgedeeld in een rooster.

Als het windveld bekend is aan de hand van de luchtdrukgegevens, kan per grid de toe- en afvoer van energie berekend worden. De Eulerse balans ziet er dan als volgt uit:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial C_x E}{\partial x} + \frac{\partial C_y E}{\partial y} + S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (4.4)$$

E	=	energiedichtheid	[J/m ²]
C_x	=	groepsnelheid van de golfcomponent in x-richting	[m/s]
C_y	=	groepsnelheid van de golfcomponent in y-richting	[m/s]
S_{in}	=	toegevoerde energie vanuit windveld	[J/sm ²]
S_{ds}	=	afgestane energie a.g.v. dissipatie	[J/sm ²]
S_{nl}	=	herverdeling van energie tussen golfcomponenten a.g.v. niet-lineaire wisselwerking	[J/sm ²]

Bij rekenmodellen die zijn gebaseerd op de energiebalansvergelijkingen kunnen direct aspecten als refractie, diffractie, shoaling en breking in rekening worden gebracht. Voor een beschrijving van deze verschijnselen wordt verwezen naar § 5.2.

4.4.2 Relatie wind- en golfparameters

Voor de berekening van golven op de Westerschelde is geen gebruik gemaakt van een golfvoorspellingsmodel, dat gebaseerd is op de energiebalans, vanwege de kleinschaligheid van het studiegebied en complexiteit van zo'n model.

Voordat computers met voldoende rekencapaciteit de toepassing van zulke modellen mogelijk maakten, bestond reeds de mogelijkheid om redelijk betrouwbare golfhoogten en perioden te voorspellen als functie van plaats en tijd in een standaard windveld.

Vlak na de Tweede Wereldoorlog zijn namelijk relaties ontwikkeld tussen golf- en windparameters, die primair zijn gebaseerd op empirische gegevens. De golfhoogte (H) en golfperiode (T) zijn hierbij gerelateerd aan de volgende factoren:

- windsnelheid (U)
- waterdiepte (d)
- strijklengte (F)
- windduur (t)

De strijklengte is de lengte van het wateroppervlak, waarover de wind effect heeft.

Om de relaties, die zijn gebaseerd op empirische gegevens, algemeen toepasbaar te maken zijn de strijklengte, waterdiepte, golfhoogte en golfperiode met behulp van de gemiddelde windsnelheid (U) en de zwaartekracht versnelling (g) op de volgende manier dimensieloos gemaakt:

- $\tilde{F} = g F / U^2$
- $\tilde{d} = g d / U^2$

- $\tilde{H} = gH/U^2$
- $\tilde{T} = gT/U$

Groen en Dorrestein (1976) hebben tussen de dimensieloze grootheden de volgende relaties gevonden:

$$\tilde{H} = 0.24 \tanh(0.71 \tilde{d}^{0.76}) \tanh\left(\frac{0.015 \tilde{F}^{0.45}}{\tanh(0.71 \tilde{d}^{0.37})}\right) \quad (4.6)$$

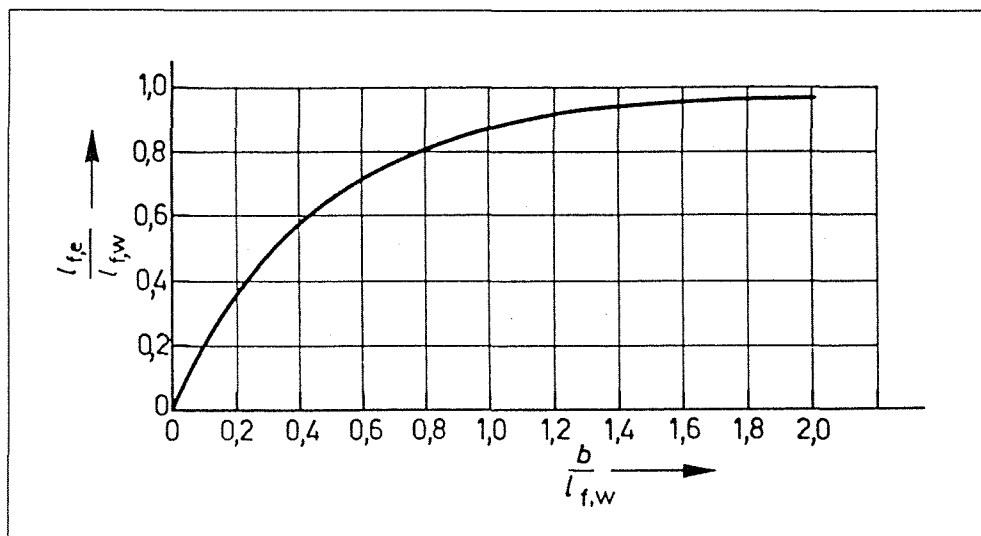
$$\tilde{T} = 2\pi \tanh(0.86 \tilde{d}^{0.37}) \tanh\left(\frac{0.035 \tilde{F}^{0.37}}{\tanh(0.86 \tilde{d}^{0.37})}\right) \quad (4.7)$$

In deze relaties wordt de windduur onbeperkt verondersteld. Op basis van bovenstaande relaties zijn de figuren in bijlage K samengesteld. Hierin worden de relaties tussen H , L , h en l_f (strijklengte) getoond.

In deze bijlage is uitgegaan van een vaste waarde voor de windsnelheid, namelijk 22 m/s (9Bf).

De golfperiode is in de figuur door middel van de dispersierelatie uitgedrukt in de golflengte.

De effectieve strijklengte l_{fe} (zie fig. 4.4) is gedefinieerd als het gedeelte van de werkelijke strijklengte, dat in rekening moet worden gebracht als de breedte b van het wateroppervlak kleiner is dan twee maal de werkelijke strijklengte $l_{f,w}$.



figuur 4.4 effectieve strijklengte

4.4.3 Golfontwikkeling op de Westerschelde

De strijklengte en de waterdiepte zijn de bepalende factoren voor golfgroei op de Westerschelde. Daarnaast kan de breedte van het wateroppervlak een beperkende factor zijn voor de strijklengte.

Doordat de strijklengte op de Westerschelde beperkt blijft, zal de windduur t een ondergeschikte rol spelen. Een windduur van enkele uren is meestal lang genoeg om een volgroeide zeegang te genereren.

De mate waarin de waterdiepte een beperkende invloed kan uitoefenen op de golfgroei is afhankelijk van de verhouding golflengte/waterdiepte. Als $d < \frac{1}{2}L$, zal de golf 'voeling' krijgen met de bodem, waardoor er dissipatie optreedt.

Hoewel de hoofdgeulen van het estuarium overwegend dieper zijn dan 15 meter, is de aanwezigheid van zandbanken bepalend voor de golfgroei. De golven zullen na een aanvankelijke groei in de geulen breken op de banken of in ieder geval beperkt worden in hun groei.

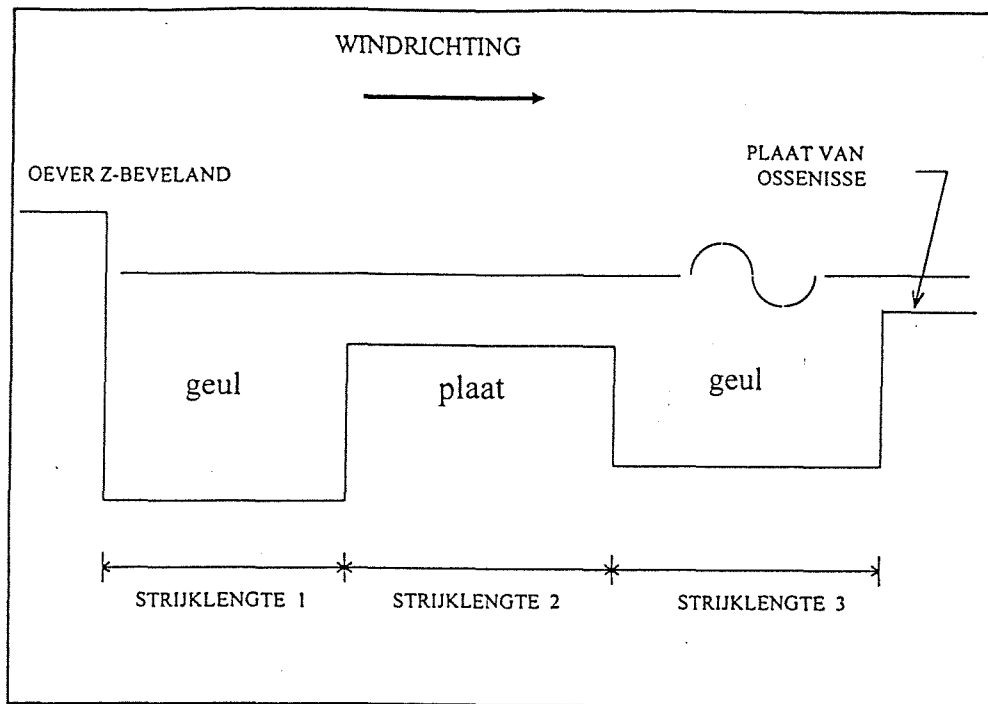
4.4.4 Bretschneider

Door de toename van het aantal beschikbare metingen zijn de relaties tussen de verschillende dimensieloze grootheden regelmatig aangepast. Naast Groen en Dorrestein speelde Bretschneider hierin een belangrijke rol.

Voor het berekenen van de significante golfhoogte H_s en de significante periode T_s in de geul voor de plaat van Ossensisse, is gebruik gemaakt van het computerprogramma BRET, dat is gebaseerd op relaties die door Bretschneider zijn ontwikkeld. Hoewel de empirische relaties die Bretschneider heeft ontwikkeld enigszins verouderd zijn, zijn ze voor een grove benadering van de optredende golfhoogten en perioden goed toepasbaar.

Aangezien het bij dit onderzoek niet gaat om een zo nauwkeurig mogelijke bepaling van de optredende golfhoogten en perioden boven de Plaat van Ossensisse, maar om een indruk te krijgen van de invloed die de golfwerking heeft op het sedimenttransport boven de plaat, lijkt het verantwoord om de relaties van Bretschneider toe te passen.

In het programma BRET moet het volgende worden ingevoerd: de gemiddelde windsnelheid, de brekerindex (zie § 5.2.3) en het aantal vakken met bijbehorende diepte en strijklengte. Het is niet mogelijk de windduur in te voeren, maar zoals hiervoor is vermeld speelt deze op de Westerschelde een ondergeschikte rol. Bij de berekeningen is uitgegaan van een constante windkracht. De waterdiepte varieert echter met het getij. De golfontwikkeling is dus een tijdafhankelijk proces. Voor de bepaling van de golfhoogte en golfperiode wordt gerekend met stappen van een half uur. In dit half uur wordt de golfontwikkeling maximaal verondersteld. Gezien de geleidelijke verandering van de waterdiepte als gevolg van het getij lijkt deze veronderstelling verantwoord. De golfvoortplantingsrichting wordt gelijk verondersteld met de windrichting. Figuur 4.5 toont de schematisatie voor de golfontwikkeling in de geul voor de Plaat van Ossensisse bij een westelijke windrichting.



Figuur 4.5 schematisatie golfontwikkeling

representatieve windrichtingen

Voor drie windrichtingen is een berekening gemaakt, namelijk voor een west-zuid-westelijke, een west-noord-westelijke en een oostelijke windrichting. De schematisaties, die voor het Bretschneider programma worden gebruikt, zijn gebaseerd op de bodemprofielen uit bijlage L. Deze bijlage is gemaakt met het software-pakket ARC-INFO voor GIS, waarbij GIS staat voor Geografisch Informatie Systeem. Ten behoeve van ARC-INFO is de Westerschelde opgedeeld in een rooster met grids van 20 bij 20 meter met ieder zijn eigen dieptewaarde. Deze dieptewaarden zijn verkregen door de interpolatie van lodingsgegevens.

De drie windrichtingen waarvoor de berekeningen zijn gemaakt, worden als representatief beschouwd voor de golfontwikkeling boven de Plaat van Ossensisse. Hoewel een zuid-west-zuidelijke wind een grotere effectieve strijklengte heeft over de Overloop van Hansweert, en dus een grotere H_s in de geul veroorzaakt, zal als gevolg van refractie (zie §5.2.4) de significante golfhoogte boven de Plaat van Ossensisse achterblijven in vergelijking met de optredende H_s tijdens een meer westelijke wind.

Bij de berekeningen is voor de windsnelheid uit de twee westelijke windrichtingen een U_{gem} gebruikt van 22 m/s (9 Bf) en voor de oostelijke windrichting een kracht van 18 m/s (8 Bf), aangezien een storm uit oostelijke richting een kleinere kans van voorkomen heeft.

De windrichting en snelheid hebben ook gevolgen voor de optredende waterstanden op de Westerschelde. Voor de westelijke windrichtingen is er gerekend met een waterstandverhoging ten gevolge van windopzet van een halve meter.

De waterdiepte in het estuarium varieert met de tijd. Op diep water heeft deze fluctuatie geen invloed op de golfontwikkeling. Boven de zandplaten is de invloed echter groot; bij droogval zal de totale strijklengte uit figuur 4.6 reduceren tot strijklengte 3. De resultaten van de drie berekeningen worden getoond in bijlage M. Bijlage M1 en M2 tonen de berekende H_s en T_s in

de geul ten westen van de Plaat van Ossenissee. Bijlage M3 toont de berekende H_s en T_s in de geul ten oosten van de Plaat van Ossenissee.

Bij een oostelijke windrichting is de golfontwikkeling onafhankelijk van de waterstand, vanwege het ontbreken van ondiepten (zie bijlage L). Daarom zijn H_s en T_s redelijk constant in de tijd.

4.5 VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE WAARDEN

4.5.1 Golfmetingen Middelplaat

De golfhoogten op de Westerschelde blijven, zelfs tijdens stormcondities, beperkt vanwege de relatief kleine strijklengtes. Doordat de golfwerking op de Westerschelde weinig relevant wordt geacht, zijn er nauwelijks golfmetingen beschikbaar.

De metingen, die recent op schorgebieden in de Westerschelde zijn verricht, hebben plaatsgevonden onder weercondities met weinig wind en daarom weinig golven.

Golfmetingen, die zich over een langere periode hebben uitgestrekt en onder weercondities met meer wind, zijn verricht ten behoeve van de Westerschelde Oeververbinding. Deze metingen werden door middel van meetboeien verricht op drie locaties rondom de Middelplaat, namelijk de locaties WOV1, WOV2 en WOV 4 (zie bijlage N).

De metingen vonden plaats in het najaar van 1991 en het voorjaar van 1992. De maximaal gemeten windkracht, die gedurende geruime tijd aanhield, bleef in deze periode beperkt tot 7 à 8 Beaufort. De relaties tussen de gemiddelde windsnelheid en de significante golfhoogte en tussen de gemiddelde windsnelheid en de significante golfperiode worden getoond in bijlage O.

De bijlage toont de golfontwikkeling gedurende één etmaal (21-12-1991), zoals die is gemeten door de drie meetboeien, met een interval van 10 minuten. Gedurende dit etmaal varieerde de wind tussen zuid-west-zuidelijke en west-noord-westelijke richtingen. Met een gewogen gemiddelde van 255° ten opzichte van het noorden.

4.5.2 vergelijking meting met berekening

In bijlage P wordt een vergelijking gemaakt tussen de gemeten waarden voor H_s en T_s op locatie WOV4 en de berekende waarden door middel van het programma BRET.

Om het half uur is een berekening gemaakt, met als uitgangspunt de op dat tijdstip heersende waterstand en windrichting.

Bij het begin van de meting, $t=0$ min tot $t=60$ min, is zichtbaar dat de gemeten golfhoogte hoger is dan de berekende, dit wordt veroorzaakt doordat de gemeten golven niet direct worden uitgedempt bij het afnemen van de wind. Dit verschijnsel doet zich in veel duidelijker mate voor bij de golfperiode, welke veel minder gevoelig is voor dissipatie dan de golfhoogte. Pas op $t=720$ min is de berekende golfperiode ongeveer gelijk aan de gemeten waarde, terwijl de windsnelheid zich al geruime tijd op een laag niveau bevindt.

Vanaf $t=700$ min gaat de wind weer toenemen, en ruimt daarbij van zuidwest naar west. Opvallend is, dat op $t=1000$ min de gemeten golfperiode ruim 50% groter is dan de berekende waarde. De gemeten golfhoogte is op dat tijdstip zo'n 35% groter dan de berekende waarde. Dit verschil kan er op duiden, dat Bretschneider bij hogere windsnelheden te lage golfhoogten en perioden berekent.

Aannemelijker is echter de verklaring, dat de golfwerking vanaf de Westerscheldemond doordringt tot de meetboei WOV4. Bretschneider veronderstelt namelijk dat de golfvoortplantingsrichting gelijk is aan de windrichting. Terwijl in werkelijkheid refractie van de golfstralen een belangrijke rol speelt. Als gevolg van deze refractie kunnen bij een westenwind de hogere golven uit de Westerscheldemond de meetboei WOV4 bereiken. Zouden de golven alleen uit pal westelijke richting komen, zoals de theorie van Bretschneider veronderstelt, dan blijft de golfontwikkeling beperkt vanwege de kleine waterdiepte boven de Hooge Platen.

4.5.3 Evaluatie

Op basis van de vergelijking tussen de golfgegevens van meetboei WOV4 en de berekende waarden met behulp van Bretschneider kan geconcludeerd worden dat de berekende golfhoogten en perioden achterblijven bij de gemeten waarden. Dit doet zich vooral voor bij hogere windsnelheden. Aangezien deze hogere windsnelheden gepaard gaan met een naar west ruimende wind zal de invloed van golven, die afkomstig zijn uit de Westerscheldemond een aanzienlijke rol kunnen spelen.

Voor de golfontwikkeling ter plaatse van de Plaat van Ossensisse, zal door het meanderende karakter van het estuarium, de invloed van golven vanuit zee belangrijk minder zijn. Hierdoor zullen de berekende golfgegevens volgens Bretschneider beter overeenstemmen met de werkelijkheid. Aangezien de golfmetingen rond de Middelpaalt de meest oostelijke (relevante) golfmetingen zijn, die op de Westerschelde zijn verricht, is een verificatie van deze stelling niet mogelijk.

5. GOLFVOORTPLANTINGSMODEL

5.1 GOLFMODEL PLAAT VAN OSSENISSE

Om het zandtransport over de Plaat van Ossenissee te bepalen is naast een 2-dimensionaal stroombeeld, zoals dat in hoofdstuk 3 is beschreven, ook het golfbeeld boven de plaat nodig. Dit golfbeeld kan worden verkregen door de ontwikkeling te beschouwen van één karakteristieke golfcomponent met golfperiode T_s en golfhoogte H_s .

Ten behoeve van dit onderzoek is met behulp van het spreadsheetprogramma Microsoft Excel een model ontwikkeld dat de voortplanting van de karakteristieke golfcomponent over de Plaat van Ossenissee berekend. De punten op de plaat waarvoor het model de golfeigenschappen berekent, corresponderen met punten waarvoor SCALDIS-100 de stroomsnelheid en de waterstand heeft berekend.

Als input voor het golfvoortplantingsmodel worden de significante golfhoogte H_s en periode T_s in de geul aan de rand van de Plaat van Ossenissee gebruikt (zie bijlage M). Hierbij wordt aangenomen dat de bijbehorende windrichting gelijk is aan de voortplantingsrichting van de karakteristieke golfcomponent.

De waarden voor H_s en T_s in de geul zijn berekend met het programma BRET voor de drie representatieve windrichtingen (§ 4.4.4).

Het golfvoortplantingsmodel is gebaseerd op de lineaire golftheorie. De achtergrond van deze theorie wordt beschreven in appendix I.

5.2 ONDIEPWATER EFFECTEN

5.2.1 Golfenergie

Een golfveld bezit potentiële en kinetische energie. Voor vrije zwaartekrachtsgolven geldt, dat de gemiddelde potentiële energie gelijk is aan de gemiddelde kinetische energie. Voor de totale gemiddelde golfenergie per oppervlakte geldt:

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (5.1)$$

Als de toevoer van energie door windwerking en dissipatie van energie door bodemwrijving buiten beschouwing blijft, geldt het behoudsprincipe van golfenergie:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

De gemiddelde energieflex per eenheid van breedte wordt:

$$U = E \cdot c_g = E \cdot c \cdot n \quad (5.3)$$

waarin:

U	=	energieflux per m'	[W/m]
E	=	golfenergie per m ²	[J/m ²]
c	=	golfsnelheid	[m/s]
c_g	=	groepsnelheid	[m/s]
n	=	verhouding van c_g tot c	[-]

De golfenergie E is evenredig met de golfhoogte H in het kwadraat (vgl. 4.6). Vanwege het behoudsprincipe van energie (vgl. 5.2) geldt:

$$H_1^2 n_1 c_1 b_1 = H_0^2 n_0 c_0 b_0 \quad (5.4)$$

De aanduiding 1 staat voor ondiep water en 0 staat voor diep water ($L/d < 1/2$).

De volgende ondiepwater-effecten beïnvloeden de golfhoogte:

- shoaling
- breking
- refractie

5.2.2 Shoaling

Shoaling is een verschijnsel, dat optreedt als golven in ondiep water komen. In de eerste instantie zal de golfhoogte kleiner worden, maar bij verdere verondieping zal de golfhoogte juist toenemen. Dit verschijnsel is te verklaren door middel van de volgende formule:

$$\frac{H_1}{H_0} = K_{sh} = \sqrt{\frac{c_0 n_0}{c_1 n_1}} \quad (5.5)$$

De parameter K_{sh} wordt de shoaling factor genoemd en stelt de verhouding voor tussen de golfhoogte op diep water H_0 en op ondiep water H_1 .

Omdat bij het verondiepen eerst de toename van n zal domineren, zal K_{sh} in de eerste instantie kleiner zijn dan 1. Bij verdere verondieping zal de afname van de golfsnelheid c domineren, waardoor K_{sh} groter wordt dan 1.

5.2.3 Breking

De toename van H als gevolg van shoaling zal doorgaan totdat een bepaalde verhouding H/d wordt overschreden. Deze verhouding wordt de brekerindex γ genoemd. De waarde voor γ kan in de praktijk nogal variëren. Gebruikelijke waarden liggen tussen 0.6 en 0.8. In het model is gebruik gemaakt van een brekerindex van 0.7.

Als een golf eenmaal is gebroken kan het principe van behoud van energie niet meer voldoen. De golfhoogte zal zich na breking, bij verdere verondieping, als volgt ontwikkelen: $H = \gamma \cdot d$

Als de bodem na een aanvankelijke verondieping zich weer gaat verdiepen, geldt voor een ongebroken golf de volgende relatie: $H_1 = K_{sh} \cdot H_0$

Als er echter breking heeft plaatsgevonden zal de waarde voor H_1 vermenigvuldigd moeten worden met de brekingsfactor K_{br} . Hierdoor wordt het energieverlies als gevolg van breking in rekening gebracht.

$$K_{br} = \frac{\gamma d_{top}}{H_{top}} \quad (5.6)$$

waarin:

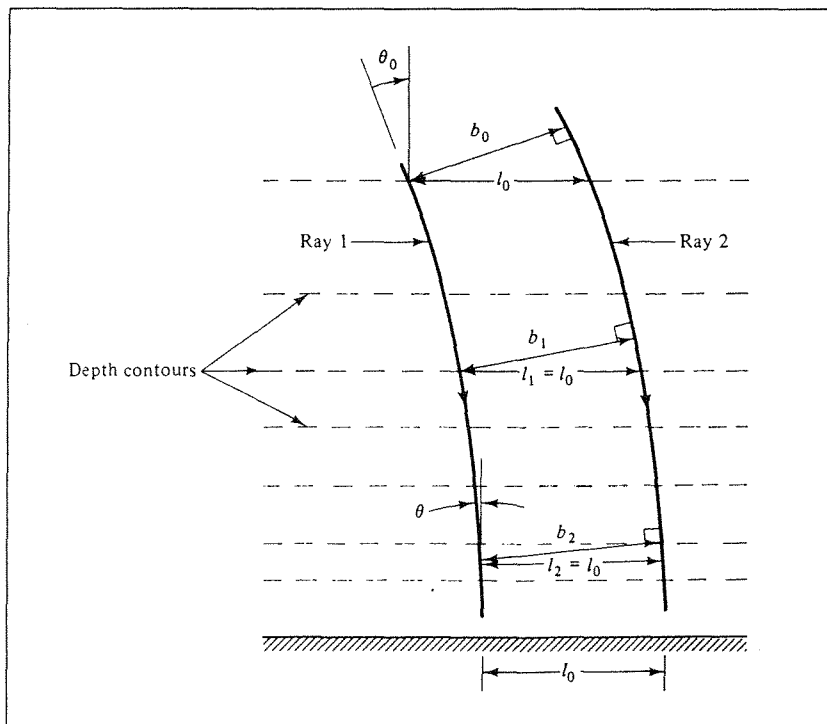
γ	=	brekerindex
d_{top}	=	waterdiepte op de top van de bank
H_{top}	=	berekende golfhoogte op de top van de bank zonder breking

Bij de Plaat van Ossenisse kan er tweemaal sprake zijn van het optreden van breking als gevolg van de aanwezigheid van het geultje, dat schuin door de plaat loopt.

Als er geen breking optreedt is het effect van shoaling op het verloop van de golfhoogte boven het geultje duidelijk zichtbaar (zie §5.3.2).

5.2.4 Refractie

Naast shoaling heeft ook refractie invloed op de golfhoogte. Door het afbuigen van de golfstralen als gevolg van verondieping, zal de breedte b tussen twee golfstralen toenemen (zie fig. 5.1)



figuur 5.1 afbuiging golfstralen als gevolg van refractie

De aanwezige energie tussen twee golfstralen op diep water zal door het optreden van refractie gespreid worden over een grotere breedte. Dit heeft tot gevolg dat de golfhoogte afneemt, omdat deze is gerelateerd aan E (golfenergie per m^2).

De mate van deze afname is afhankelijk van de hoek van inval op diep water (φ_0).

De hoek φ_1 is te berekenen met behulp de wet van Snellius, bij gegeven φ_0 en waterdiepte.

$$\frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi_1} = \frac{c_0}{c_1} \quad (5.7)$$

Voor evenwijdige dieptelijnen geldt:

$$\frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi_1} = \frac{b_0}{b_1} \quad (5.8)$$

Omdat E evenredig is met de golfhoogte in het kwadraat geldt de onderstaande relatie. Hierbij stelt K_{ref} de refractie factor voor.

$$\frac{H_1}{H_0} = K_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{b_0}{b_1}} \quad (5.9)$$

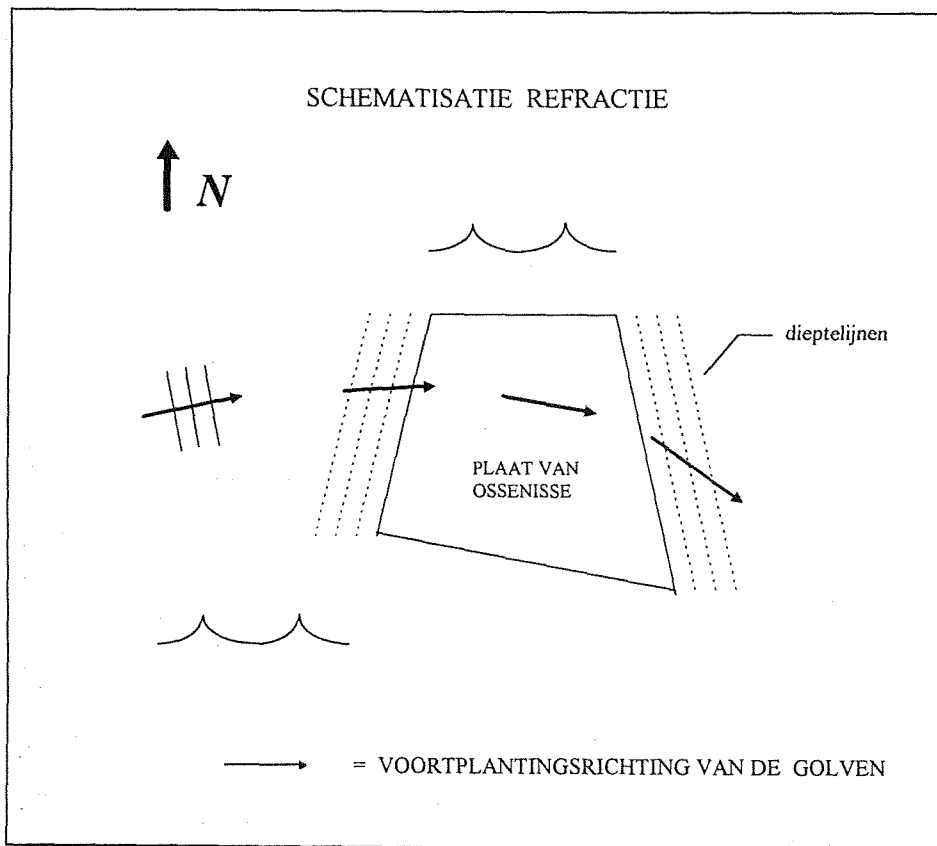
Volgens de wet van Snellius, zullen golfstralen bij verondieping afbuigen naar de loodlijn op de dieptelijnen, terwijl bij verdieping de golfstralen juist van deze loodlijn af zullen buigen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5.2. In deze figuur is de Plaat van Ossenissee geschematiseerd met rechte en evenwijdige dieptelijnen voor zowel de westelijke als de oostelijke plaatrand.

De schematisatie van de Plaat van Ossenissee komt niet overeen met de werkelijkheid, omdat de dieptelijnen van de oostelijke plaatrand en in minder mate die van de westelijke plaatrand een gebogen vorm hebben. Er is gekozen voor rechte dieptelijnen, aangezien bij gebogen dieptelijnen de golfstralen naar elkaar zullen toe buigen als de plaatrand een bolle vorm heeft, en van elkaar zullen af buigen als de plaatrand een holle vorm heeft.

De westkant van de Plaat van Ossenissee vertoont een bolle vorm, zodat de golfstralen bij een wind uit westelijke richtingen naar elkaar zullen toe buigen, waardoor er een bundeling van energie plaatsvindt en een vergroting van de golfhoogte. Bij verdere verondieping zullen deze golfstralen elkaar echter gaan kruisen. Omdat theoretisch gezien de energie tussen de golfstralen gelijk blijft, zullen de golfhoogten bij kruisende golfstralen oneindig hoog worden. In werkelijkheid vindt er een niet-lineaire energie-uitwisseling plaats, loodrecht op de golfstralen, waardoor de golfhoogten beperkt blijven.

Door in de schematisatie rechte en evenwijdige dieptelijnen toe te passen wordt deze problematiek voorkomen.

Uit berekeningen met het golfvoortplantingsmodel blijkt dat tijdens het springtij-hoogwater de invloed van refractie boven de Plaat van Ossenissee verwaarloosbaar is. Bij lagere waterstanden speelt refractie wel een rol. Aangezien de optredende golfhoogten dan ook geringer zijn, is de invloed van refractie op het uiteindelijke sedimenttransport niet significant.



figuur 5.5 schematisatie refractie boven Plaat van Ossenisse

5.2.5 Invloed stroming op golven

Niet alleen de waterdiepte heeft invloed op de golfontwikkeling, maar ook de aanwezige stroming speelt een rol. De getijstroming over de Plaat van Ossenisse is van dusdanige grootte, dat de invloed ervan op de golfontwikkeling niet te verwaarlozen valt. Temeer omdat de maximale eb- en vloedstroom, evenals de golfvoortplantingsrichting bij een westelijke wind, dwars over de plaat gericht is.

Tegenstroom veroorzaakt de volgende verschijnselen met betrekking tot de golfontwikkeling:

- afname golfsnelheid
- afname golflengte
- toename golfhoogte
- toename refractie

Bij deze verschijnselen is uitgegaan van een constante golfperiode. Meestroom heeft in vergelijking tot tegenstroom een omgekeerd effect op de golfontwikkeling.

golfsnelheid en golflengte

Voor de invloed van stroming op de golfsnelheid geldt de volgende transformatie:

$$c' = c + U_{\parallel} \quad (5.10)$$

waarin:

c'	=	getransformeerde golfsnelheid	[m/s]
c	=	golfsnelheid	[m/s]
U_{\parallel}	=	gem. stroomsnelheid in golfvoortplantingsrichting	[m/s]

U_{\parallel} is de component van de stroomsnelheid \bar{U} in de golfvoortplantingsrichting. Bij tegenstroom zal U_{\parallel} negatief zijn. De grootte van U_{\parallel} is afhankelijk van de hoek tussen de stroomvector en de golfstraal. De richting van deze golfstraal is weer afhankelijk van de golfsnelheid c (zie vgl. 5.7).

Uit vgl. 5.10 blijkt, dat de stroomsnelheid U_{\parallel} van invloed is op de golfsnelheid c en dus ook op de golfvoortplantingsrichting. De grootte van c en de hoek van inval ϕ kunnen door middel van een 2-punts iteratie worden berekend, wat inhoudt dat de uitkomst van de ene iteratie als invoer voor de volgende dient. Eerst worden c en ϕ berekend zonder de invloed van stroming. Vervolgens wordt de grootte van U_{\parallel} bepaald aan de hand van de berekende ϕ . Daarna wordt er een berekening uitgevoerd, waarbij U_{\parallel} wel wordt meegenomen. Uit deze berekening volgen de uiteindelijke c' en ϕ . Uitgaande van een constante T zal de golflengte gelijk worden aan $T \cdot c'$.

golfhoogte

Doordat de golflengte door stroming beïnvloed wordt, zal de golfsteilheid bij tegenstroom toenemen en bij meestroom afnemen. Vergelijking 5.5 toont aan dat niet alleen de golfsteilheid, maar ook de golfhoogte wordt beïnvloed door stroming. Dit gebeurt via de aangepaste golfsnelheid c' . Het effect van tegenstroom op de golfhoogte is te vergelijken met shoaling.

Uit de berekeningen blijkt dat in vergelijking met de invloed van de stroming op de golfsnelheid, de invloed van de stroming op de golfhoogte beperkt blijft.

refractie

Wat betreft het optreden van refractie, is tegenstroom op te vatten als verondieping en meestroom als verdieping. Doordat de stroming boven de Plaat van Ossenissee niet overal dezelfde richting en dezelfde snelheid heeft, is het niet mogelijk om stroming, voor wat betreft refractie, te modelleren als rechte lijnen evenwijdige dieptelijnen.

De invloed van stroming op de refractie boven de Plaat van Ossenissee is vanwege de complexiteit niet meegenomen in het golfvoortplantingsmodel.

5.3 UITKOMSTEN GOLFVOORTPLANTINGSMODEL

5.3.1 Representatieve raaien

Met behulp van het golfvoortplantingsmodel kan de golfvoortplanting, met intervallen van minimaal 30 min, over de plaat van Ossenissee worden berekend. Dit is gebeurd voor drie evenwijdige raaien met een onderlinge afstand van 250 meter. De raaien lopen in west-oost richting.

Bijlage Q1 toont de bodemprofielen van de beschouwde raaien. Deze profielen zijn gebaseerd op lodingsgegevens uit 1988.

De 'inham' in profiel 3 en in mindere mate in profiel 2 wordt veroorzaakt door de geultje, dat schuin door de plaat loopt.

De 'gaten' die optreden in de bodemprofielen op het hogere gedeelte van de plaat worden veroorzaakt door het ontbreken van hoogtemetingen. De meetschepen kunnen tijdens vloed, het hoogste gedeelte van de plaat niet bereiken. Hiertoe moeten waterpassingen op de plaat zelf worden verricht.

Bij de keuze van de drie representatieve raaien spelen de volgende overwegingen een rol:

- Boven de raaien moet tijdens springvloed voldoende water staan om een significant zandtransport mogelijk te maken over de plaat.
- Het optreden van golfrefractie mag een niet te grote rol spelen.

Vanwege de eerste overweging is raai 1 niet te noordelijk gekozen, aangezien daar het hoogste gedeelte van de plaat ligt (hoger dan NAP +2m).

Wat betreft de tweede overweging wordt verwezen naar §5.2.4, waarin de complexiteit van het modelleren van refractie is behandeld.

Door deze complexiteit is een raai die zuidelijker ligt dan raai 3 minder geschikt vanwege de invloed van de Schaar van Ossensisse, die ervoor zorgt dat de dieptelijnen aan zowel de westkant als de oostkant van de plaat een sterk gekromd zijn.

profielen volgens SCALDIS-100

Omdat de met het golfvoortplantingsmodel berekende golfhoogten gecombineerd moeten worden met de met SCALDIS-100 berekende stroomsnelheden, is gebruik gemaakt van de bathymetrie, waarmee in SCALDIS-100 wordt gerekend. De Westerschelde is hiervoor opgedeeld in een raster met grids van 100 bij 100 meter, met ieder een eigen dieptewaarde. De profielen van de drie representatieve raaien, gebaseerd op de bathymetrie van SCALDIS, worden getoond in bijlage Q2 en Q3. De waarden op de x-as stellen de x-coördinaten voor ten opzichte van Parijs.

Vanwege de grotere afstand tussen de roosterpunten zijn deze profielen aanzienlijk grover dan de profielen uit bijlage Q1. De ligging van de profielen in bijlage Q2 is wel dezelfde als in bijlage Q1.

5.3.2 Berekende golfhoogten

west-zuid-westenwind

Aangezien bij een west-zuid-westenwind de hoogste golven optreden (zie bijlage M), is deze windrichting voor dit onderzoek als standaard windrichting gekozen. De daarbij aangenomen windkracht is constant en bedraagt 22 m/s (9Bf).

Bijlage R1 toont de met het golfvoortplantingsmodel berekende golfhoogten boven de drie raaien op $t=2370$ min bij een west-zuid-westenwind.

De waarden voor de x-as van bijlage R corresponderen met de waarden van bijlage Q2.

Op dit tijdstip is de waterstand boven de Plaat van Ossensisse maximaal, zodat ook de golfhoogten op dit tijdstip hun maximum zullen bereiken.

Vanwege de hoge waterstand van NAP +3.4m (inclusief de veronderstelde windopzet van 0,5m) is de invloed van de ondiepwatereffecten op de golfhoogte minder belangrijk. Wel is het effect van shoaling duidelijk zichtbaar bij raai 3 ter hoogte van $x=57500$. Door de ligging van het geultje neemt op dit punt de waterdiepte vrij sterk toe. Als gevolg van shoaling heeft dit een grotere golfhoogte tot gevolg.

Interessanter is het golfhoogteverloop op $t=2310$ min, als de waterstand NAP +2,30m bedraagt (zie bijlage R2).

De golfhoogte op diep water aan de westzijde van de Plaat van Ossensisse bedraagt ongeveer 90 cm.

Na een aanvankelijke daling als gevolg van verondieping neemt de golfhoogte boven raai 3, op $x=57750$, weer toe. Dit wordt veroorzaakt door de ligging van het geultje.

Boven het hoge gedeelte van de Plaat van Ossensisse, als x groter is dan 58250, zijn de golven boven de drie raaien gebroken, en is de golfhoogte gelijk aan $\gamma \cdot d$.

Vanwege de energiedissipatie door het breken van de golven, zal aan de oostzijde van de zandplaat, ondanks het groter worden van de waterdiepte, de golfhoogte beperkt blijven.

oostenwind

Ter illustratie wordt in bijlage R3 de golfontwikkeling bij een oostenwind getoond op $t=2370$ (maximale waterstand).

Het golfbeeld boven de Plaat van Ossensisse bij oostenwind geeft een omgekeerd beeld als het golfbeeld bij een westenwind.

De golfhoogten op dieper water blijven bij deze windrichting achter in vergelijking met een westelijke wind vanwege de lagere windsnelheid (8 Bf) en de afwezigheid van windopzet.

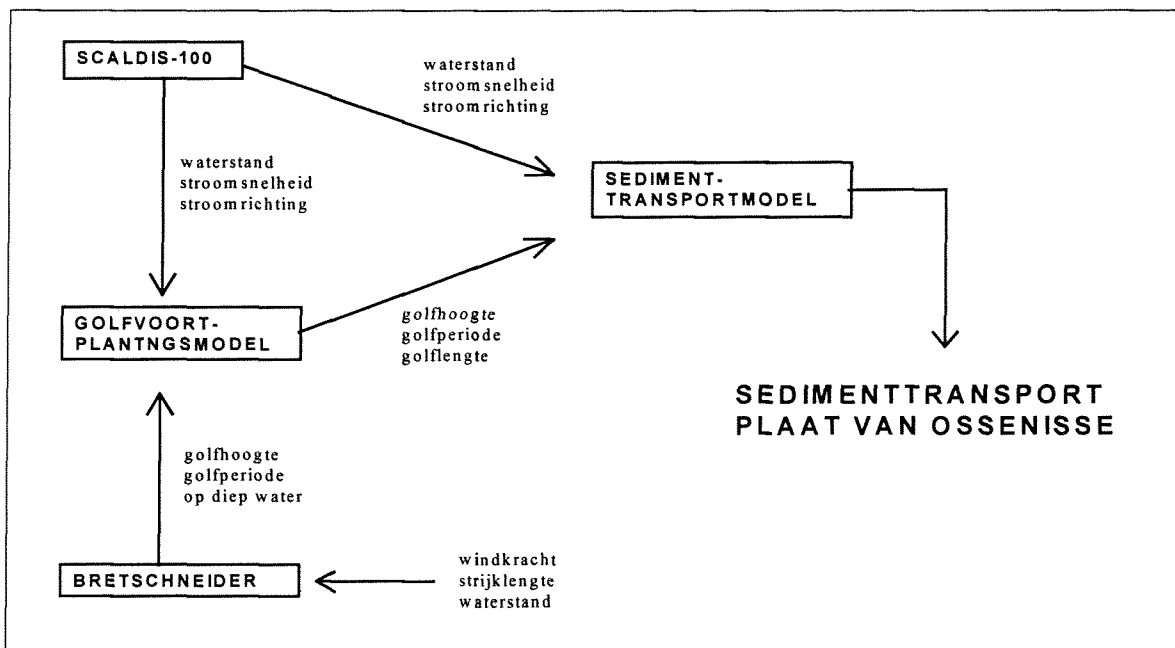
Omdat het hoogste gedeelte van de Plaat van Ossensisse zich aan de oostkant bevindt, zal als gevolg van breking de golfhoogte boven de plaat sterk afnemen.

6. SEDIMENTTRANSPORTMODEL

6.1 ALGEMEEN

Om het sedimenttransport over de Plaat van Ossenissee te berekenen is het noodzakelijk om te beschikken over optredende waterstanden, snelheden en golfgegevens. De waterhoogten en de stroomsnelheden worden berekend met SCALDIS-100 en de golfgegevens, bestaande uit de significante golfhoogte, periode en golflengte, worden berekend met het golfvoortplantingsmodel.

De waterstand- stroom- en golfgegevens vormen de input voor het sedimenttransportmodel. Dit model kan per roosterpunt het sedimenttransport berekenen op basis van de formule van Bijker voor sedimenttransport. Het stroomschema in figuur 6.1 geeft een overzicht van de in- en output van de toegepaste modellen.



figuur 6.1 stroomschema toegepaste modellen

6.2 TRANSPORTMECHANISME VOOR STROMING

6.2.1 Bodemtransport

Einstein (1950) geeft op de volgende fundamentele manier uitdrukking aan het zandtransport in een rivier:

$$S = \int_0^h c(z)V(z)dz \quad (6.1)$$

S	=	sedimenttransport	[m ³ /sm]
h	=	waterdiepte	[m]
c	=	sedimentconcentratie	[-]
z	=	hoogte boven de bodem	[m]
V	=	stroomsnelheid	[m/s]

Om deze uitdrukking om te zetten in een bruikbare formule, maakt Einstein onderscheid tussen bodemtransport en zwevend transport.

Het totale sedimenttransport bestaat uit de sommatie van het bodemtransport en het zwevend transport:

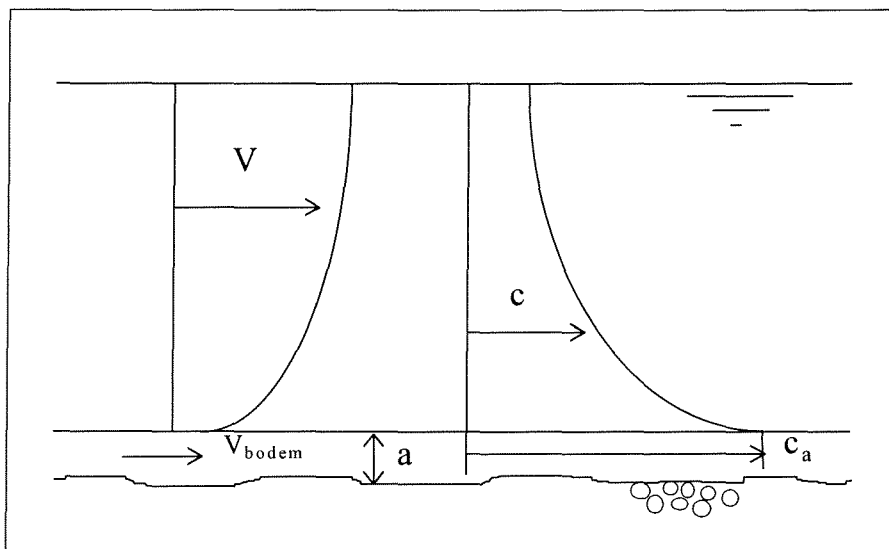
$$S_{\text{tot}} = S_s + S_b \quad (6.2)$$

Het bodemtransport vindt plaats in een bepaalde laag boven de bodem met hoogte a . In deze laag wordt zowel de concentratie c_a als de bodemsnelheid constant verondersteld (fig 6.1).

Bijker (1971) past hetzelfde principe toe als Einstein, maar neemt een grotere hoogte voor de bodemlaag. In plaats van twee maal de korreldiameter stelt Bijker de bodemgrenslaag a gelijk aan de bodemruwheid r (1 tot 10 cm). De ribbelhoogte van het bed is bepalend voor de waarde van r .

Dit levert de volgende relatie op:

$$S_b = r V_{\text{bodem}} c_a \quad (6.3)$$



figuur 6.2 zwevend en bodemtransport

Bijker paste voor het bodemtransport de enigszins aangepaste formule van Kalinske-Frijlink (1952) toe. Deze formule is ontwikkeld voor rivieren, waarbij het grootste gedeelte van het sedimenttransport plaats vindt in de bodemlaag. Aangezien in kustgebieden, door de grote turbulentie als gevolg van brekende golven, veel sediment zich in suspensie bevindt, kan deze formule alleen voor het bodemtransport worden toegepast.

formule van Bijker voor bodemtransport:

$$S_b = 5 D_{50} \frac{V}{C} \sqrt{g} \exp\left(-0.27 \frac{\Delta D_{50} \rho g}{\mu \tau_c}\right) \quad (6.4)$$

S_b	=	sedimenttransport in de bodemgrenslaag	$[m^3/sm]$
D_{50}	=	gemiddelde korreldiameter	$[m]$
V	=	diepte gemiddelde stroomsnelheid	$[m/s]$
C	=	Chézy-coëfficiënt	$[m^{1/2}/s]$
g	=	zwaartekrachtversnelling	$[m/s^2]$
ρ	=	dichtheid water	$[N/m^3]$
Δ	=	relatieve sediment dichtheid $[(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]$	$[-]$
μ	=	ribbelfactor	$[-]$
τ_c	=	bodemschuifspanning a.g.v. stroming	$[N/m^2]$

$$\tau_c = \rho g \frac{V^2}{C^2} \quad (6.5)$$

Het laatste gedeelte van het rechterlid van vergelijking 6.4 staat bekend als de opwoelingsparameter. In deze parameter bevindt zich de Shields parameter ($=\tau_c/\Delta\rho g D_{50}$). De Shields parameter speelt een rol bij het begin van bewegen van een sedimentdeeltje.

opwoelingsparameter:

$$\frac{\Delta D_{50} \rho g}{\mu \tau_c}$$

Het bodemtransport gedeeld door het eerste gedeelte van formule 6.4, wordt de transportparameter genoemd. In dit gedeelte van de formule is het bodemtransport rechtevenredig met de stroomsnelheid. Een sedimentdeeltje, dat als gevolg van de bodemschuifspanning is opgewoeld, zal door de stroomsnelheid worden getransporteerd.

transportparameter:

$$S_b / D_{50} \frac{V}{C} \sqrt{g}$$

6.2.2 Zwevend transport

Met het zwevend transport (suspended load), wordt het sedimenttransport bedoeld boven de bodemgrenslaag r :

$$S_s = \int_r^h c(z) V(z) dz \quad (6.6)$$

De integraal in formule 6.6 wordt opgelost door de introductie van de zogenaamde Einstein-integralen. Uit deze integralen kan Q worden verkregen. Door middel van Q is het mogelijk om S_s rechtstreeks te koppelen aan S_b .

$$S_s = 1,83 Q S_b \quad (6.7)$$

Q is opgebouwd uit twee Einstein-integralen, namelijk I_1 en I_2 . Dit leidt tot de volgende relatie:

$$Q = (I_1 \ln(33h / r) + I_2) \quad (6.8)$$

waarin:

$$I_1 = 0,216 \frac{A(z_* - 1)}{(1 - A)z_*} \int_A^1 \left(\frac{1 - \zeta}{\zeta} \right)^{z_*} \partial \zeta \quad (6.9)$$

$$I_2 = 0,216 \frac{A(z_* - 1)}{(1 - A)z_*} \int_A^1 \left(\frac{1 - \zeta}{\zeta} \right)^{z_*} \ln(\zeta) \partial \zeta \quad (6.10)$$

waarin:

$$\begin{aligned} A &= \text{dimensieloze bodemruwheid} = r/h \\ \zeta &= \text{dimensieloos niveau} = z/h \\ z_* &= \text{getal van Rouse} \end{aligned}$$

Het getal van Rouse kan als volgt worden uitgedrukt:

$$z_* = \frac{w}{\kappa u_*} \quad (6.11)$$

waarin:

$$\begin{aligned} w &= \text{valsnelheid sedimentdeeltje} \\ \kappa &= \text{Von Karman coëfficiënt} = 0,4 \\ u_* &= \text{schuifspanningsnelheid} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \end{aligned} \quad (6.12)$$

De integralen I_1 en I_2 worden in het sedimenttransportmodel opgelost door de waterdiepte boven de grenslaagdikte r op te delen in elementen van 0,1 meter. Op deze wijze wordt voor elke laagdikte van 10 centimeter een waarde voor Q berekend. Door de afzonderlijke waarden voor Q te sommeren wordt de waarde Q voor de totale waterdiepte verkregen.

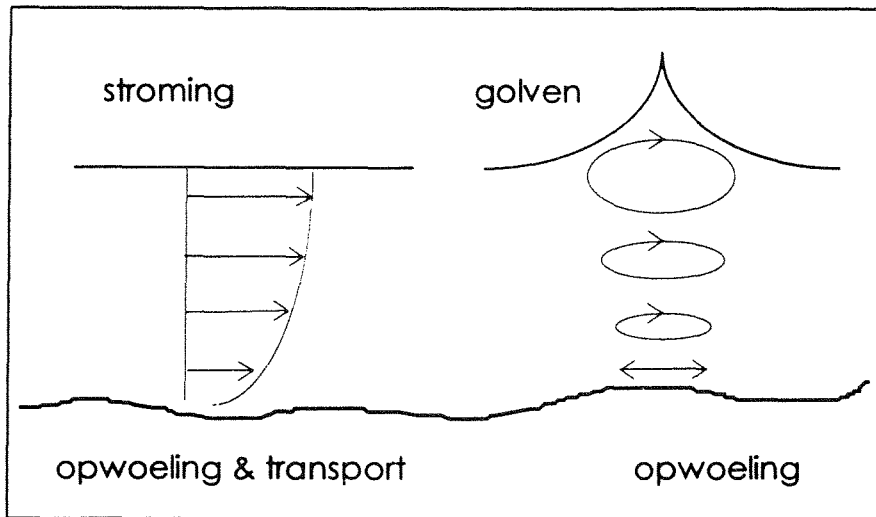
6.3 TRANSPORTMECHANISME VOOR GOLVEN EN STROMING

De bodemschuifspanning, als gevolg van stroming en golfwerking, veroorzaakt opwoeling. De stroomsnelheid is bepalend voor het transport van sediment (fig.6.3).

Als er alleen sprake is van stroming zal de concentratie van sediment in suspensie laag zijn.

Door golfwerking zal deze concentratie echter aanzienlijk kunnen toenemen.

De horizontale orbitaalsnelheid aan de bodem \hat{u}_0 en de orbitaaluitwijking \hat{a}_0 zijn bepalend voor de bodemschuifspanning als gevolg van golfwerking (zie appendix I.3).



figuur 6.3 invloed golven en stroming op sedimenttransport

Bijker ontwikkelde een transportmechanisme voor de combinatie van golven en stromingen door de bodemtransportformule (vgl. 6.4) aan te passen. De bodemschuifspanning τ_c wordt hierbij vervangen door de bodemschuifspanning τ_{cw} . Waarin de werking van stroom (current) en golven (waves) op de volgende manier in rekening is gebracht:

$$\tau_{cw} = \tau_c + \frac{1}{2} \hat{\tau}_w \quad (6.13)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \tau_c &= \text{bodemschuifspanning a.g.v. stroming} \\ \hat{\tau}_w &= \text{gemiddelde bodemschuifspanning a.g.v. orbitaalbeweging} \\ &= \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_0^2 \end{aligned} \quad (6.14)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \hat{u}_0 &= \text{maximale horizontale orbitaalsnelheid aan de bodem} \\ f_w &= \text{wrijvingsfactor} = 0,3 \quad \text{voor } \frac{\hat{a}_0}{r} < 1,59 \\ f_w &= \exp\left(-5,98 + 5,21\left(\frac{\hat{a}_0}{r}\right)^{-0,19}\right) \quad \text{voor } \frac{\hat{a}_0}{r} \geq 1,59 \end{aligned} \quad (6.15)$$

waarin:

$$\begin{aligned}\hat{a}_0 &= \text{maximale orbitaalbeweging aan de bodem} \\ r &= \text{bodemuwheid (= dikte bodemgrenslaag)}\end{aligned}$$

De bodemschuifspanning τ_{cw} beïnvloedt niet alleen het bodemtransport (vgl. 6.4), maar heeft ook invloed op de Einstein integraal. Dit gebeurt via de schuifspanningsnelheid u_* . In de uitdrukking voor de schuifspanningsnelheid (vgl. 6.12) moet τ_c vervangen worden door τ_{cw} . De schuifspanningsnelheid is bepalend voor het getal van Rouse.

6.4 SEDIMENTTRANSPORT PLAAT VAN OSSENISSE

6.4.1 Golfgedreven stroming

Om het sedimenttransport boven de Plaat van Ossenisse te berekenen moet per locatie de bodemschuifspanning τ_{cw} , waterstand, stroomsnelheid en stroomrichting worden bepaald. De richting van het sedimenttransport wordt gelijk verondersteld aan de stroomrichting. De voortplantingsrichting van de golven wordt niet van invloed op richting van het sedimenttransport geacht, aangezien de orbitaalbeweging alleen voor opwoeling zorgt en niet voor netto transport.

hogere-orde effecten

Het golfvoortplantingsmodel gaat uit van de lineaire golftheorie. De orbitaalbeweging onder het golfoppervlak wordt volgens deze golftheorie voorgesteld als een gesloten circulaire beweging. In werkelijkheid is deze beweging echter niet gesloten, vanwege de aanwezigheid van een netto-snelheidscomponent in de richting van de golfvoortplanting.

De grootte van deze golfgedreven stroming kan worden benaderd met behulp van de tweede-orde golftheorie van Stokes (1847). Met behulp van deze theorie is het mogelijk om, afhankelijk van de optredende golfhoogte en golfperiode, de golfgedreven stroomsnelheid te berekenen als functie van de waterdiepte (zie fig. 6.4).

Uit berekeningen blijkt dat de orde grootte van de gemiddelde golfgedreven stroomsnelheden die boven de Plaat van Ossenisse kunnen optreden, volgens de golftheorie van Stokes maximaal centimeters per seconde bedraagt. In aanmerking genomen, dat deze maximale snelheden optreden tijdens hoog water en niet tijdens de maximale getijstroom, lijkt het verantwoord om de invloed van de golfgedreven stroming boven de Plaat van Ossenisse te verwaarlozen.

6.4.2 Ontbinding sedimenttransport in vectoren

Door middel van het sedimenttransportmodel wordt het sedimenttransport berekend voor punten die op de drie representatieve raaien liggen (bijlage O2). De afstand tussen de onderlinge punten op de raai bedraagt 250 meter.

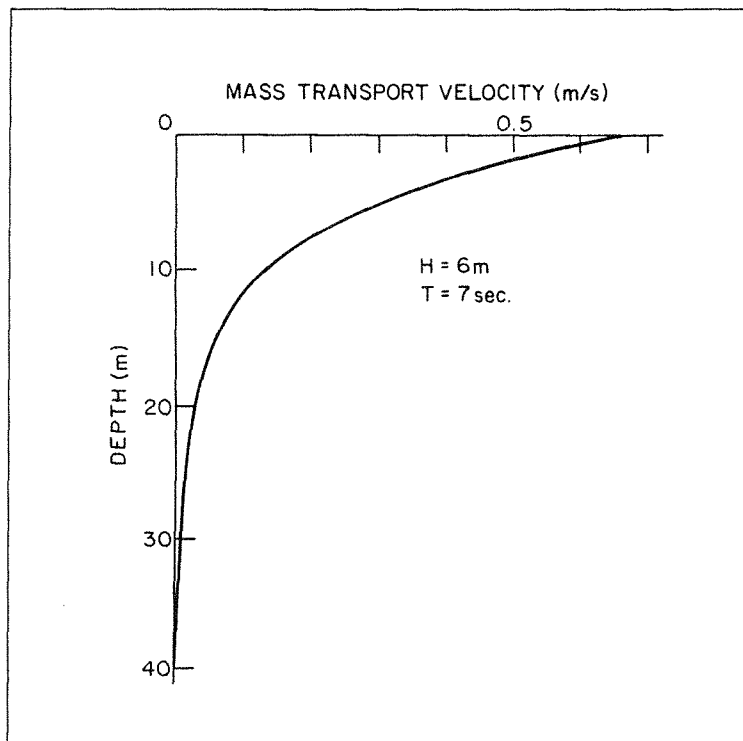
Het zandtransport wordt bepaald per interval van 30 minuten. De output van SCALDIS-100, waarmee in dit model is gerekend, is bepalend voor de grootte van dit interval.

Door de richtingsvector van het sedimenttransport te ontbinden in een component in x-richting en y-richting kan het sedimenttransport worden berekend, dat evenwijdig aan de raaien loopt. De positieve x-richting loopt oost-west, evenals de beschouwde raaien, en de positieve y-richting zuid-noord.

Door het sedimenttransport per half uur, dat in positieve x-richting is gericht, te sommeren, wordt het totale vloedsedimenttransport verkregen tijdens één getij.

Het sedimenttransport in negatieve x-richting is gedefiniëerd als het ebsedimenttransport.

De som van het vloedsedimenttransport en het ebsedimenttransport is gelijk aan het resulterend sedimenttransport in de beschouwde raai.



figuur 6.4 golfgedreven stroming

6.4.3 Sedimenttransport raai 1

Bijlage S1 toont het sedimenttransport, gesommeerd over een heel getij, in raai 1 voor een west-zuid-westenwind (9 Bf).

De waarden van de x-as corresponderen met de x-waarden van bijlage Q2, waarin de geschematiseerde bodemligging wordt getoond.

Het sedimenttransport in vloedrichting is uitgezet op de positieve y-as en het sedimenttransport in ebrichting op de negatieve y-as.

Voor het gedeelte van raai 1 tot $x=58000$ is er sprake van een resulterend vloedtransport.

Tussen $x=58000$ en $x=58500$ is het resulterend transport te verwaarlozen.

De toename van het vloedsedimenttransport ter plaatse van $x=58750$, is te verklaren uit het stroombeeld tijdens eb op $t=2520$ (bijlage F).

Op dit tijdstip treedt boven het punt ($582500, 58750$) een stroomsnelheid van $0,5\text{ m/s}$ in vloedrichting op. Waarschijnlijk zal deze snelheid in werkelijkheid niet optreden.

Vanaf $x=59000$ domineert het ebtransport.

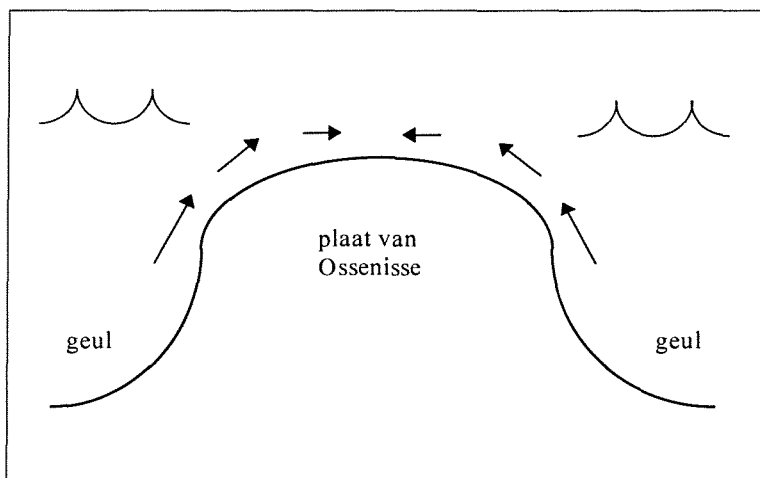
Als de raaklijn aan de grafiek een negatieve richtingscoëfficiënt heeft, heeft ook het sedimenttransport een negatieve gradiënt. Een negatieve gradiënt in het sedimenttransport resulteert in aanzanding, terwijl een positieve gradiënt erosie veroorzaakt.

Voor het gedeelte tot $x=58000$ is er sprake van aanvoer van sediment uit vloedrichting.

Vanwege de negatieve gradiënt zal er, uitgaande van het sedimenttransport in x-richting, sprake zijn van aanzanding op zowel de westelijke plaatrand als de plaat zelf.

Voor het gedeelte vanaf $x=59000$ is er sprake van aanvoer vanuit eb-richting. De negatieve gradiënt zorgt voor aanzanding op de oostelijke plaatrand.

In figuur 6.5 is het sedimenttransport in x-richting kwalitatief voorgesteld door middel van vectoren.



figuur 6.5 sedimenttransport in x-richting

6.4.4 Sedimenttransport raai 2 en 3

Als alleen wordt gekeken naar de x-component van het sedimenttransport zal er dus sprake zijn van sedimentatie op zowel de beide plaatranden als de plaat zelf. Als het sedimenttransport een belangrijke component in de y-richting heeft kan er, ondanks een negatieve gradiënt in x-richting, toch sprake zijn van erosie. Dit verschijnsel doet zich vooral voor langs de plaatranden beneden NAP, waar de optredende stroming onder invloed staat van de stroming in de geulen. Aangezien de stroming in de geulen bijna haaks staat op de raai-richting, zal de y-component van het sedimenttransport overheersen.

Dit is met name te zien in het sedimenttransport voor de raaien 2 en 3 (bijlage S2 en S3). De knik in zowel het vloed- als eb-sedimenttransport, ter plaatse van $x=57000$, wordt veroorzaakt door de invloed van de geulstroming, die in dit punt een grote y-component heeft. Vanwege deze y-component wordt alleen het x-sedimenttransport tussen $x=57250$ en $x=59000$ als redelijk representatief beschouwd voor het totale sedimenttransport. Dit geldt voor alle drie de raaien.

De invloed van het geultje, dat schuin over de plaat loopt is duidelijk te zien in het sedimenttransport voor raai 2 en 3. Ter plaatse van het geultje ontstaat een 'deuk' in de grafiek, waardoor er aan de oostrand van het geultje een positieve gradiënt ontstaat. Dit kan oorzaak zijn voor de migratie van het geultje in oostelijke richting (§7.1).

Afgezien van de verstoring als gevolg van het geultje, vertoont het resulterend sedimenttransport voor raai 2 en 3 hetzelfde beeld als het sedimenttransport voor raai 1; het sedimenttransport in x-richting is aan de westkant van de plaat vloedgedomineerd met een negatieve gradiënt, terwijl aan de oostkant het sedimenttransport ebgedomineerd is met eveneens een negatieve gradiënt.

6.4.5 Invloed bodemruwheid

De gekozen waarden voor de korreldiameter D_{50} zijn gebaseerd op bodemonsters. De gemiddelde korreldiameters variëren op de Plaat van Ossensisse van 150 μm boven op de plaat tot 200 μm aan de randen.

In het sedimenttransportmodel is de bodemruwheid r de enige parameter waarvoor een aanname is gepleegd. De bodemruwheid r , die door Bijker wordt gehanteerd, kan variëren tussen de 1 en 10 cm. In het sedimenttransportmodel is gerekend met een waarde voor r van 3 cm, aangezien de plaat van Ossensisse een betrekkelijk gladde structuur heeft. Voor een Noordzeestrand wordt vaak gerekend met een r van 6 cm.

De bodemruwheid is in de formule voor bodemtransport (vgl. 6.4) verdisconteerd via de Chézy-factor C ; hoe kleiner r , hoe groter C . Een grote C veroorzaakt een kleine schuifspanning τ_{cw} , zodat zowel de opwoelingsparameter als de transportparameter een kleinere waarde aannemen bij een kleinere r .

Het zwevend transport is gekoppeld aan het bodemtransport door middel van de Einstein-integraal Q (vgl. 6.7). De bodemruwheid komt in deze integraal tot uitdrukking via de dimensieloze bodemruwheid $A=r/h$ en het getal van Rouse (vgl. 6.11). Hoe kleiner r , hoe groter z_* . Als de waarden voor A en z_* bekend zijn, kan Q worden berekend. Een kleine A veroorzaakt evenals een kleine z_* een grote Q .

Een grote bodemruwheid zorgt dus enerzijds, via z_* , voor een grote Q , anderzijds zorgt een grote bodemruwheid, via A , voor een kleine Q .

Bijlage T1 en T2 tonen respectievelijk het vloed- en ebsedimenttransport in raai 1 voor verschillende waarden van r . Uit deze bijlage blijkt dat het sedimenttransport op dieper water groter is naarmate r kleiner is. Kennelijk overheerst op dieper water de invloed van de dimensieloze bodemruwheid A .

6.5 INVLOED GOLVEN OP SEDIMENTTRANSPORT

6.5.1 Golfwerking raai 1

Een belangrijke vraag is, in hoeverre de golfwerking boven de Plaat van Ossensisse het totale sedimenttransport beïnvloedt. Bijlage U1 toont het resulterend sedimenttransport met en zonder golven voor raai 1. Aan de hand van deze vergelijking zou geconcludeerd kunnen worden, dat de invloed van golven op het sedimenttransport niet van belang is.

Wordt echter het resulterend sedimenttransport opgesplitst in een vloedsedimenttransport en een ebsedimenttransport (zie bijlage U2 en U3), dan is te zien dat de invloed van de golfwerking wel degelijk aanwezig is, maar dat de invloed van de golfwerking tijdens vloed en eb elkaar opheffen.

6.5.2 Golfwerking raai 2 en 3

Uit bijlage V en W blijkt dat de invloed van de golven op het resulterend sedimenttransport voor raai 2 en 3, evenals voor raai 1, gering is.

De invloed van de golfwerking op met name het vloedtransport is echter voor raai 2 en 3 beduidend groter dan voor raai 1. De oorzaak hiervan ligt in de verhouding tussen de golfhoogte en de waterdiepte. Als deze verhouding groot is, zal de orbitaalbeweging aan de bodem gering zijn, waardoor er weinig extra opwoeling zal plaatsvinden. Als deze verhouding klein is zal de orbitaalbeweging aan de bodem eveneens gering zijn vanwege de kleine golfhoogte.

De westkant van de plaat is als gevolg van de ligging van het geultje minder hoog ter plaatse van raai 2 en 3. De golfwerking kan hier dus verder op de plaat doordringen.

6.5.3 Maximale stroming

Hoewel de invloed van de golfwerking op het afzonderlijke eb- en vloedtransport aanzienlijk is, verandert het resulterend sedimenttransport voor alle drie de raaien niet significant als de golfwerking buiten beschouwing wordt gelaten. De westrand van de plaat blijft ebdominant en het sedimenttransport aan de oostrand van de plaat vloeddominant.

De invloed van de stroming is dus bepalend voor de grootte en richting van het resulterend sedimenttransport. Bijlage X toont de maximale absolute stroomsnelheden voor de verschillende raaien. Absoluut wil zeggen dat zij niet ontbonden zijn in x-richting. Uit bijlage X blijkt, dat de richting van het resulterend sedimenttransport correspondeert met de dominante maximale stroomrichting. De verklaring hiervoor is dat het sedimenttransport tijdens maximale stroming bepalend is voor het grootste gedeelte van het totale eb- danwel vloedtransport.

6.5.4 Oostenwind

Om de stelling, dat het stroomregime boven de Plaat van Ossensisse bepalend is voor de grootte en richting van het resulterend sedimenttransport, te onderbouwen, is ook het sedimenttransport berekend in geval van een oostelijke wind.

Om de invloed van de golven uit oostelijke richting goed tot zijn recht te laten komen is de verlaging van de waterstand als gevolg van afwaaiing niet in beschouwing genomen. Het resultaat van deze berekening voor het sedimenttransport in raai 1 wordt getoond in bijlage Y.

Er kan geconcludeerd worden, dat de golfwerking bij oostenwind duidelijk minder invloed heeft op het eb- en vloedsedimenttransport dan de golfwerking bij een westelijke wind.

Doordat het oostelijke gedeelte van de Plaat van Ossensisse relatief hoog ligt, zullen de meeste golven reeds op de plaatrand breken.

Het resulterend sedimenttransport met golfwerking bij een oostelijke wind verschilt kwalitatief nauwelijks van het resulterend sedimenttransport met golfwerking bij een westelijke wind (vergelijk bijlage U1 en Y1). Dit bevestigt het beeld, dat de invloed van golfwerking boven de Plaat van Ossensisse gering is.

6.6 GROOTTE VAN DE BEREKENDE TRANSPORTEN

6.6.1 Bepaling jaarlijkse erosie en sedimentatie

In §6.4.3 en §6.4.4 is het kwalitatieve sedimenttransport behandeld voor de drie representatieve raaien. In deze paragraaf wordt aan de hand van de uitkomsten van het rekenmodel een ruwe schatting gemaakt van de jaarlijkse aanzanding en erosie op de Plaat van Ossensisse.

Uit §6.5 blijkt, dat de golfwerking geen significante invloed heeft op het resulterend sedimenttransport. Het lijkt daarom aannemelijk, om voor het jaarlijks gemiddeld resulterend sedimenttransport tijdens springtij het gemiddelde van de twee grafieken in bijlage U1, V1 en W1 aan te houden.

Uit berekeningen blijkt, dat het resulterend sedimenttransport boven NAP tijdens doortij gering is. Aangezien er geen berekeningen beschikbaar zijn van het gemiddeld getij is grofweg gesteld dat het jaarlijks gemiddeld resulterend sedimenttransport per getij gelijk is aan het gemiddelde resulterend sedimenttransport tijdens springtij gedeeld door twee. Als het jaarlijks gemiddelde resulterend sedimenttransport per getij wordt vermenigvuldigd met het aantal getijden per jaar (ongeveer 700) kan de omvang van jaarlijkse aanzanding en erosie worden bepaald.

6.6.2 Berekende jaarlijkse erosie en sedimentatie

raai 1

Zoals is gesteld in §6.4.4 kan het berekende sedimenttransport in x-richting boven NAP (van $x=57250$ tot $x=59000$) als redelijk representatief worden beschouwd voor het totale berekende sedimenttransport in de representatieve raaien.

Aan de hand van bijlage U1, kan op grond van de in §6.6.1 beschreven methode, de jaarlijkse sedimentatie aan de westkant van raai 1 worden geschat op $200 \text{ m}^3/\text{m}'$ uit vloedrichting. Over een afstand van ongeveer 900 m zou dit een gemiddelde berekende ophoging van 20 tot 30 cm per jaar geven.

De toename in het sedimenttransport tijdens vloed ter plaatse van $x=58750$ kan worden toegeschreven aan de door SCALDIS-100 berekende stroomsnelheid. Deze berekende stroomsnelheid is waarschijnlijk niet realistisch (zie §6.4.3). Als deze toename in het vloedtransport wordt genegeerd, zal het berekende sedimenttransport aan de oostkant van raai 1 er hetzelfde uitzien als in raai 2 en 3, en zal er sprake zijn van een berekende jaarlijkse aanzanding uit eb-richting van $35 \text{ m}^3/\text{m}'$. Dit resulteert in een berekende ophoging van ongeveer 5 cm per jaar aan de oostkant van raai 1. In totaal vindt volgens de berekening in raai 1, tussen $x=57250$ en $x=59000$, een jaarlijkse sedimentatie plaats van $235 \text{ m}^3/\text{m}'$.

raai 2

Uit bijlage V1 is op te maken dat het berekende sedimenttransport in raai 2 aan de westkant van de raai duidelijk wordt beïnvloed door de ligging van het geultje. Tussen $x=57250$ en $x=58500$ vindt herverdeling van sediment plaats, die zorgt voor een migratie van de geul in oostelijke richting. Volgens de berekening is aan de oostkant van de plaat, net als in raai 1, sprake van een geringe sedimentatie uit eb-richting, die zorgt voor een berekende jaarlijkse ophoging van 5 cm. Volgens bijlage V1 zou jaarlijks tussen $x=57250$ en $x=59000$ in totaal slechts $30 \text{ m}^3/\text{m}'$ sediment worden afgezet.

raai 3

Aan de westkant van raai 3 (van $x=57250$ tot $x=57500$) is volgens de berekening sprake van een jaarlijkse sedimentatie uit vloedrichting van $300 \text{ m}^3/\text{m}'$ (zie bijlage W1). Dit zou leiden tot een ophoging van 1,2 m per jaar.

Ter hoogte van het geultje is weer sprake van een herverdeling van sediment. Aan de oostkant van raai 3 treedt volgens de berekening een jaarlijkse sedimentatie op van $50 \text{ m}^3/\text{m}'$ uit ebrichting. Dit houdt een berekende ophoging van 10 cm per jaar in. Volgens de berekeningen wordt er jaarlijks in raai 3, tussen $x=57250$ en $x=59000$, $350 \text{ m}^3/\text{m}'$ sediment afgezet.

7. MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN

7.1 DIEPTEVERSCHILLEN PLAAT VAN OSSENISSE

7.1.1 Diepteverschilkaart 1986-1990

Bijlage Z toont de verschilkaart van 1986 en 1990 van het gebied rond de Plaat van Ossenis. Langs de oostelijke rand van de plaat van Ossenis is sprake van erosie, terwijl langs de westelijke rand sprake is van erosie voor het zuidelijke gedeelte en sedimentatie voor het noordelijke gedeelte. Langs de noordelijke rand treedt sedimentatie op.

Op de plaat zelf is hoofdzakelijk sprake van lichte sedimentatie aan de randen (boven NAP). Met uitzondering van de zuidelijke uitloper van de plaat. Hier is sprake van sterke sedimentatie.

Noord-oostelijk van het geultje, dat door de plaat van Ossenis loopt, is sprake van erosie.

De diepteverschilkaart biedt de mogelijkheid om de uitkomsten van het sedimenttransportmodel te verifiëren, met name wat betreft het kwalitatieve beeld van de optredende erosie en sedimentatie op de Plaat van Ossenis.

De sedimentatie langs de oostkant en westkant van de plaat boven NAP, is te verklaren door de negatieve gradiënt in het sedimenttransport (§6.4.3).

Alleen het gedeelte van de raaien dat boven NAP ligt kan in beschouwing worden genomen, omdat voor dit gedeelte de x-component van het sedimenttransport representatief is voor het totale resulterende sedimenttransport (§ 6.4.4).

De positieve gradiënt in het sedimenttransport in raai 2 en 3, ter plaatse van de oostelijke rand van het geultje, kan de oorzaak zijn van het eroderen van de noordoostelijke rand van het geultje.

7.1.2 Bodemprofielen

Naast de diepteverschilkaart, waarin een 2-dimensionaal beeld wordt gegeven van de opgetreden erosie en sedimentatie, kunnen bodemprofielen van verschillende jaren een beeldvorming geven van de morfologische ontwikkeling.

Bijlage AA toont de profielen van de drie representatieve raaien. Naast de profielen van 1986 en 1990 is ook het profiel van 1995 in de bijlage opgenomen, om de meer recente ligging van de plaat weer te geven.

Door middel van een schatting van het jaarlijkse berekende sedimenttransport (zie §6.6) is het mogelijk om voor de drie representatieve raaien de berekende aanzanding en erosie te vergelijken met de opgetreden verschillen tussen de profielen in bijlage AA.

Hierbij moet worden opgemerkt, dat de berekende jaarlijkse aanzanding en erosie, zoals deze volgt uit §6.6, vermenigvuldigd dient te worden met 4, om een vergelijking te kunnen maken tussen de profielen van 1986 en 1990 uit bijlage AA.

Om de x-waarden uit bijlage Y te vergelijken met de x-waarden die gebruikt in het sedimenttransportmodel, wordt verwezen naar bijlage Q2.

De berekende erosie aan de oostkant van de Plaat van Ossenis, van maximaal een decimeter per jaar, komt goed overeen met de gemeten verschillen tussen de profielen van 1986 en 1990. Van 1990 tot 1995 is er echter sprake van een stabilisatie in de groei.

Vanwege de hoge ligging van het oostelijke gedeelte van de plaat (\pm NAP +2m), zal de aanvoer van sediment afnemen bij een verdere ophoging. De oorzaak hiervoor is de afname van de stroomsnelheden bij verondieping.

De migratie van het geultje in oostelijke richting is duidelijk zichtbaar bij de verschilprofielen van raai 3. Deze migratie gaat gepaard met verzanding van het geultje. In 1995 is het geultje bijna geheel verzand en is er een nieuw geultje ontstaan.

7.2 OOSTELIJKE GEULRAND

7.2.1 Verdieping oostelijke geul

Tot nu toe is alleen het plaatgedeelte boven de NAP in beschouwing genomen. Volgens bijlage AA, treedt langs de westelijke plaatrand beneden NAP, na een aanvankelijke erosie (1986-1990), sedimentatie op (1990-1995). De oostelijke plaatrand daarentegen is in de periode 1986-1995 voortdurend achteruit gegaan.

Als alleen het sedimenttransport in x-richting wordt beschouwd, moet er volgens het sedimenttransportmodel vanwege de negatieve gradiënt juist sedimentatie op de plaatranden optreden. De oorzaak van de achteruitgang van de oostelijke plaatrand ligt in de verdieping van de geul die langs de oostkant van de Plaat van Ossensisse stroomt. Deze verdieping is opmerkelijk, aangezien deze geul gebruikt wordt als stortlocatie (zie bijlage AB). Jaarlijks wordt hier gemiddeld $\pm 300.000 \text{ m}^3$ baggerspecie gestort.

De geul ten oosten van de Plaat van Ossensisse wordt als stortlocatie gebruikt om het verleggen van de hoofdstroom tegen te gaan. De hoofdstroom loopt van het Zuidergat naar de Overloop van Hansweert. De laatste jaren heeft deze hoofdstroom namelijk de neiging zich te verleggen richting Middelgat ten koste van de Overloop van Hansweert. Als er niet zou worden ingegrepen zou de waterbeweging waarschijnlijk weer dezelfde loop nemen als een halve eeuw geleden (zie fig. 2.3).

7.2.2 Sedimenttransport raai 4

Een verklaring voor de verdieping van de geul ten oosten van de Plaat van Ossensisse kan worden gegeven, als het berekende sedimenttransport in raai 4 wordt beschouwd. Deze raai loopt in de lengterichting van de geul (zie bijlage AC). Bijlage AD toont het bodemprofiel volgens SCALDIS-100.

Bijlage AE toont het sedimenttransport in raai 4, zoals dat berekend is met het sedimenttransportmodel. De bodemdiepte van de geul in aanmerking nemend, is de invloed van de golfwerking aan de bodem te verwaarlozen.

Op de x-as van de grafiek is de afstand in y-coördinaten uitgezet. Raai 1,2 en 3 die over de Plaat van Ossensisse lopen, kruisen raai 4 bij de respectievelijke y-coördinaten 382500, 382250 en 382000.

Het sedimenttransport, dat analoog aan de stroomsnelheid ebgedomineerd is, heeft ter hoogte van bovengenoemde y-coördinaten een positieve gradiënt. Het noordelijke gedeelte van raai 4, daarentegen vertoont een negatieve gradiënt. Het sediment, dat zuidelijker is geërodeerd zal hier weer sedimenteren.

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1 SEDIMENTTRANSPORTMODEL

Zoals vermeld in §1.2 is het doel van dit onderzoek het bepalen van het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse, waarbij de invloed van de golfwerking centraal staat.

Het bepalen van dit sedimenttransport is van belang om inzicht te krijgen in de rol die het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse speelt bij de aanzanding van de Drempel van Hansweert.

Op grond van de resultaten van het sedimenttransportmodel kan gesteld worden, dat de invloed van de golfwerking boven de Plaat van Ossensisse op het afzonderlijke eb- en vloedtransport aanzienlijk kan zijn.

Doordat de invloed van de golfwerking tijdens vloed en eb elkaar opheffen is de invloed van de golfwerking op het resulterend sedimenttransport niet significant.

Het kwalitatieve sedimenttransport (eb- of vloeddominant) wordt door de golfwerking niet beïnvloed.

Een mogelijke verklaring hiervoor kan liggen in het gegeven dat de waterstand tijdens maximale vloed en maximale eb praktisch gelijk is. Hierdoor zullen de optredende golfhoogten tijdens maximale eb en maximale vloed niet veel van elkaar verschillen.

Ook een toenemende windkracht of een draaiende windrichting zal weinig invloed hebben op het verschil tussen de optredende golfhoogten tijdens eb en vloed. Dit komt doordat het tijdsverschil tussen maximale vloed en eb slechts 1½ uur bedraagt.

Het resulterend sedimenttransport boven de Plaat van Ossensisse heeft voor zowel het westelijke gedeelte van de plaat dat vloedgedomineerd is, als het oostelijke gedeelte dat ebgedomineerd is, een negatieve gradiënt. Dit houdt in dat er volgens de berekeningen aan de westkant en aan de oostkant van de plaat sprake zal zijn van sedimentatie. De sedimentatie aan de westkant zal aanzienlijk groter zijn dan de sedimentatie aan de oostkant, vanwege de grotere negatieve gradiënt in het vloedgedomineerde sedimenttransport.

Het vermoeden, dat er tijdens springtij in combinatie met een westerstorm sprake zal zijn van een aanzienlijke hoeveelheid sediment, die over de plaat van Ossensisse richting Drempel van Hansweert wordt getransporteerd, wordt door de uitkomsten van het sedimenttransportmodel niet bevestigd.

8.2 BEPERKINGEN TOEGEPASTE MODELLEN

Het sedimenttransportmodel is slechts een benadering van de werkelijkheid. Te meer daar er gebruik wordt gemaakt van de uitkomsten van andere modellen (SCALDIS-100, BRET en het Golfvoorplantingsmodel). Om de resultaten van de gebruikte modellen goed te kunnen beoordelen, worden de volgende punten onder de aandacht gebracht:

SCALDIS-100

- De stroomsnelheden volgens SCALDIS-100 zijn boven de platen niet afgeregeld. Door het gebruik van één Manning-waarde voor zowel geulen als platen, kan de werkelijke ruwheidswaarde boven de platen significant afwijken. De golfwerking kan boven de platen van invloed zijn op de grootte van de ribbelhoogte, en via de ribbelhoogte op de ruwheidswaarde.
- De stroomsnelheden volgens SCALDIS-100 zijn berekend zonder dat de applicatie, die de afstroming van platen tijdens eb en de toestroming van de platen tijdens vloed in rekening brengt, is toegepast (zie §3.2.1). Bij de berekening voor de stroomsnelheden tijdens springtij is geen rekening gehouden met een waterstandsverhoging als gevolg van windopzet, terwijl daar in het golfvoortplantings-model wel rekening mee is gehouden.

BRETSCHNEIDER

- De met het programma BRET berekende significante golfhoogten en perioden zijn door het gebrek aan golfmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde (onder stormachtige condities) niet te verifiëren.
- In het programma BRET is het niet mogelijk de tijdsduur van een bepaalde windsnelheid op te geven.

Golfvoortplantingsmodel

- Als de verhouding van de golfhoogte tot de waterdiepte (H/d) groot wordt, is de lineaire golftheorie minder goed toepasbaar vanwege de toenemende invloed van niet-lineaire effecten. Dit geldt ook voor een grote golfsteilheid (H/L).
- De lineaire golftheorie veronderstelt een gesloten orbitaalbeweging, terwijl deze in werkelijkheid niet gesloten is. Dit is de oorzaak is voor het ontstaan van een golfgedreven stroming in golfvoortplantingsrichting.
- De schematisatie van de Plaat van Ossensisse, die is toegepast om de golfrefractie te benaderen, sluit door het gebruik van evenwijdige dieptelijnen de bundeling en spreiding van golfenergie uit.
- De getijstroming over de Plaat van Ossensisse heeft een directe, niet-lineaire invloed op de golfhoogte.

Sedimenttransportmodel

- Het sedimenttransportmodel is gebaseerd op de transportformule van Bijker. De invloed van de golfwerking op de bodemruwheid r is in het model niet in rekening gebracht. Via de bodemruwheid kan de opwoeling en het transport van sediment beïnvloed worden.
- De transportformule van Bijker is slechts één van de ontwikkelde sedimenttransport-formules. De formule van Van Rijn zou voor dit model ook toegepast kunnen worden.

8.3 MORFOLOGIE

De morfologische ontwikkeling van het onderzoeksgebied in de periode 1986-1995 toont een doorgaande verdieping van de geul tussen de oostkant van de Plaat van Ossensisse en de Drempel van Hansweert. Deze verdieping kan mogelijk verklaard worden door de positieve gradiënt in het berekende resulterend sedimenttransport ter hoogte van de representatieve raaien boven de Plaat van Ossensisse. Dit resulterend sedimenttransport is sterk ebgedomineerd.

De verdieping van de beschouwde geul veroorzaakt erosie van de oostelijke plaatrand en zorgt voor een steilere bodemhelling.

Afgezien van de resultaten van het sedimenttransportmodel, die duiden op een ebgedomineerd sedimenttransport aan de oostkant van de Plaat van Ossenis, is directe aanzanding van de Drempel van Hansweert, als gevolg van een resulterend sedimenttransport over de Plaat van Ossenis in vloedrichting, onwaarschijnlijk doordat de tussenliggende geul als buffer fungeert.

8.4 AANBEVELINGEN

Op grond van de resultaten van het sedimenttransportmodel en de morfologische ontwikkeling van het studiegebied lijkt het niet noodzakelijk om het sedimenttransport over de plaat van Ossenis mee te nemen in een nadere studie naar de ontwikkeling van de Drempel van Hansweert. De golfwerking heeft ook tijdens springtij in combinatie met een westerstorm geen significante invloed op het sedimenttransport over de plaat.

De vraag of bij de ontwikkeling van een sedimenttransportmodel voor de Westerschelde ook de platen in het estuarium gemodelleerd moeten worden, kan op grond van dit onderzoek niet worden beantwoord. Omdat dit onderzoek zich richt op één specifieke plaat in het estuarium is uitgebreider onderzoek noodzakelijk. Hierbij zal de uitvoering van snelheids- golf- en sedimenttransportmetingen op de platen centraal moeten staan. De resultaten van deze metingen kunnen gebruikt worden ter calibratie en verificatie van (nog te ontwikkelen) computermodellen.

LITERATUUR

- Airy, G.B., 1845.** On Tides and Waves, Encyclopedia Metropolitan, London.
- Battjes, J.A., 1993a.** Korte Golven, college-dictaat B76. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Battjes, J.A., 1993b.** Windgolven, college-dictaat B78. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Berben, F.M.L., 1978.** Ribbelsvorming, waterbeweging en hun onderlinge samenhang in een getijdengebied (Plaat van Ossensisse, Westerschelde). Rijksuniversiteit Utrecht, Geografisch Instituut.
- Berben, F.M.L., 1985.** Meandergeometrie en morfodynamisch gedrag van estuariumgeulen. Rijkswaterstaat, DGW, Nota GEOMOR 862.
- Bijker, E.W., 1971.** Longshore Transport Computations, Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Volume 97.
- Bijker, E.W., E. Van Hijum en P. Vellinga, 1976.** Sand Transport by Waves, Proceedings 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu Volume II.
- Dalrymple, R.A. & Dean, R.G., 1992.** Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series on Ocean Engineering -Volume 2.
- Einstein, H.A., 1950.** The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., Technical Bulletin No. 1026.
- Frijlink, H.C., 1952.** Discussion of the Sediment Transport Formulas of Kalinske, Einstein, and Meyer-Peter and Muller in Relation to Recent Sediment Transport Measurements in Dutch Rivers, 2me Journal Hydraulic, Soc. Hydraulic de France, Grenoble.
- Groen, P. & Dorrestein, R., 1976.** Zeegolven, KNMI opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied, no. 11.
- Ikeda, H., 1989.** River meandering, Water Resources Monograph 12, American Geophysical Union, Washington.
- Kleef van, A.W., 1994.** Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat, Westerschelde. Rijkswaterstaat dir. Zeeland (concept).
- Nielsen, P., 1993.** Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering -Volume 4.
- Miles, J.W., 1957.** Journal of Fluid Mechanics, Vol 3, No 2.
- Nortier, I.W., 1989.** Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen.
- Nielsen, P., 1993.** Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering -Volume 4.
- Phillips, O.M., 1957.** Journal of Fluid Mechanics Vol 2, No 2.
- Stokes, G.G., 1847.** On the Theory of Oscillatory Waves, Trans. Cambridge Philos. Soc.
- Tank, F.T.G., 1996a.** Het gedrag van drempels in de Westerschelde, Literatuurstudie en hypothesen. Rijksuniversiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen. IMAU Rapport 95-18.
- Tank, F.T.G., 1996b.** Het gedrag van drempels in de Westerschelde, Parameterisatie. Rijksuniversiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen. IMAU Rapport 96-08.
- Velden van der, E.T.J.M., 1995.** Coastal Engineering, college-dictaat F7. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Vries, de M., 1994.** Rivieren, college-dictaat F8. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Verspuy, C., 1987.** Lange golven, college dictaat B73 Deel I. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

APPENDIX I

LINEAIRE GOLFTHEORIE

LINEAIRE GOLFTHEORIE

I.1 Golfparameters

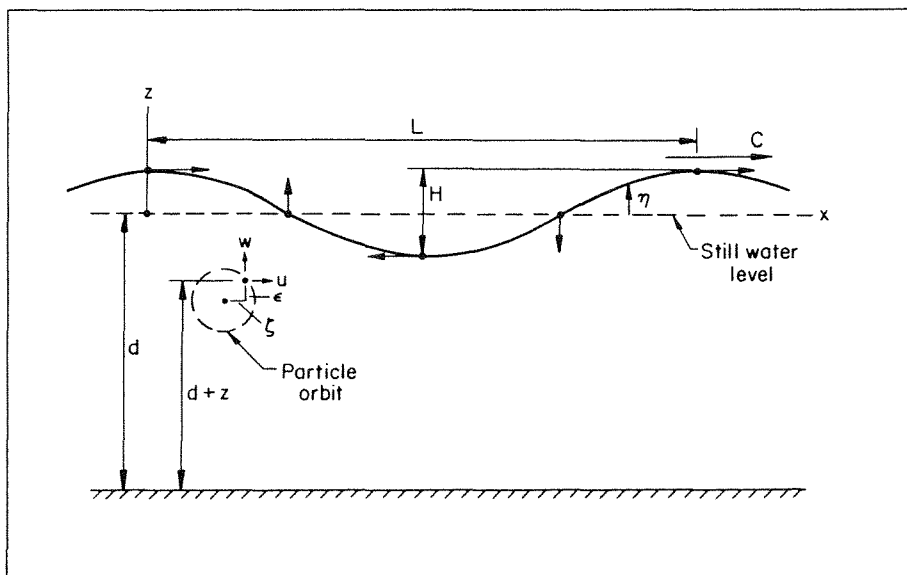
De lineaire golftheorie, ontwikkeld door Airy (1845), is de meest eenvoudige golftheorie, en wordt toegepast voor 2-dimensionale vrije zwaartekrachts-oppervlakte golven. Deze golven, die zich voor doen op het grensvlak tussen water en lucht, ontleen hun potentiële energie aan het zwaartekrachtsveld.

De lineaire golftheorie blijkt goed te voldoen voor de berekening van de snelheden aan de bodem. Aangezien de bodemsnelheden bepalend zijn voor het sedimenttransport is voor dit onderzoek de lineaire golftheorie toegepast.

De lineaire golftheorie heeft als uitgangspunt een sinusvormige lopende golf. De positieve x-richting is gelijk aan de voortplantingsrichting van de golf.

In figuur I.1 worden de golfparameters gedefinieerd. Daarnaast toont de figuur de orbitaal beweging van een waterdeeltje onder het golfoppervlak.

T	=	golfperiode
L	=	golflengte = $c \cdot T$
c	=	golfsnelheid
H	=	golfhoogte
η	=	uitwijking wateroppervlak t.o.v. Still Water Level
z	=	niveau t.o.v. S.W.L.
d	=	waterdiepte
u	=	horizontale orbitaalsnelheid
w	=	verticale orbitaalsnelheid
ζ	=	horizontale verplaatsing waterdeeltje
ϵ	=	verticale verplaatsing waterdeeltje



figuur I.1 definitie golfparameters

De verticale uitwijking van het wateroppervlak als functie van tijd en plaats kan als volgt worden beschreven:

$$\eta(x,t) = \frac{1}{2} H \sin(\omega t - kx) \quad (I.1)$$

waarin:

$$\begin{array}{llll} \omega & = & 2\pi/T & = \text{hoekfrequentie} & [r/s] \\ k & = & 2\pi/L & = \text{golfgetal} & [r/m] \end{array}$$

I.2 Dispersierelatie

In de vorige paragraaf is opgemerkt, dat in de lineaire golftheorie wordt uitgegaan van vrije zwaartekrachtsgolven. Deze golfbeweging wordt gekenmerkt door de dispersierelatie tussen de golfperiode en de golflengte.

dispersierelatie:

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} d\right) \quad (I.2)$$

Omdat de golfsnelheid c gelijk is aan L/T geldt:

$$c = \frac{g T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{cT} d\right) \quad (I.3)$$

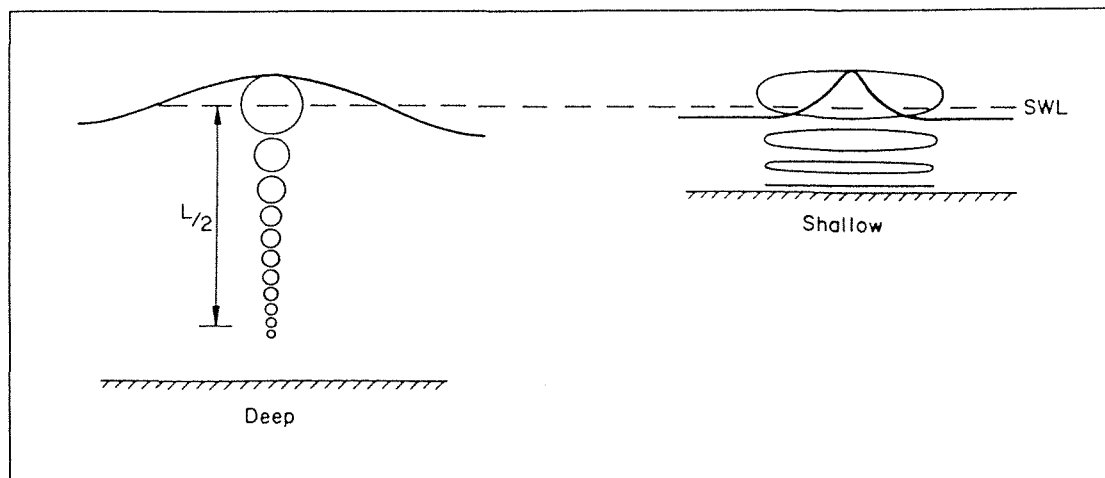
Doordat in beide vergelijkingen de variabelen L en c zowel in het rechter- als in het linkerlid voorkomen, is de oplossing van deze vergelijkingen een iteratief proces.

I.3 Orbitaalbeweging

De orbitaalbeweging onder het golfoppervlak wordt volgens de lineaire golftheorie voorgesteld als een gesloten circulaire beweging, waarvan de straal afneemt met afnemende diepte. Onder de golftop is de richting van de orbitaalbeweging gelijk aan de golfvoortplantingsrichting en onder een golfdal is deze tegengesteld aan de golfvoortplantingsrichting.

In ondiep water wordt de circulaire orbitaalbeweging elliptisch als gevolg van de invloed van de bodem (zie fig. I.2).

Aan de bodem benadert de orbitaalbeweging een rechte lijn, omdat de orbitaalsnelheid hier alleen een horizontale component heeft.



Figuur I.2 orbitaalbeweging

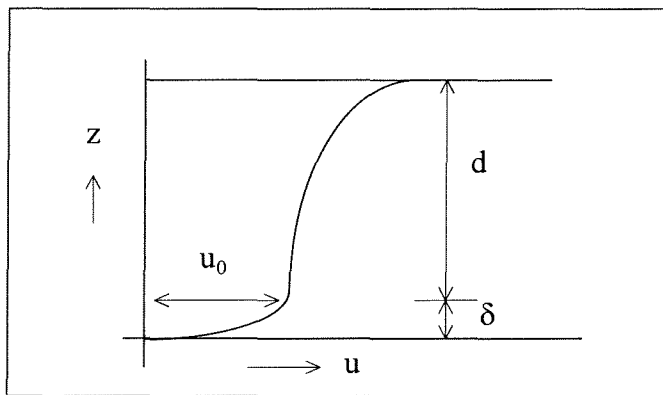
Volgens de lineaire golftheorie kan de horizontale orbitaalsnelheid als volgt worden gedefinieerd:

$$u = \frac{\omega H}{2} \cdot \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \sin(\omega t - kx) \quad (I.4)$$

voor de verticale snelheid geldt:

$$w = \frac{\omega H}{2} \cdot \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \cos(\omega t - kx) \quad (I.5)$$

De term $(\omega t - kx)$ stelt de fase van de orbitaalbeweging voor. Het gedeelte van de vergelijking voorafgaand aan $\cos(\omega t - kx)$, stelt de amplitude voor behorende bij een bepaalde niveau z . De amplitude van u als functie van z wordt getoond in figuur I.3.



figuur I.3 horizontale orbitaalsnelheid

De dikte van de bodemgrenslaag blijft als gevolg van de orbitaalbeweging beperkt. Hierdoor kan de bodemsnelheid worden gerepresenteerd door de snelheid u_0 op hoogte δ boven de bodem. Aangezien op deze hoogte z gelijk is aan $-d$, geldt de volgende relatie voor de amplitude van u_0 :

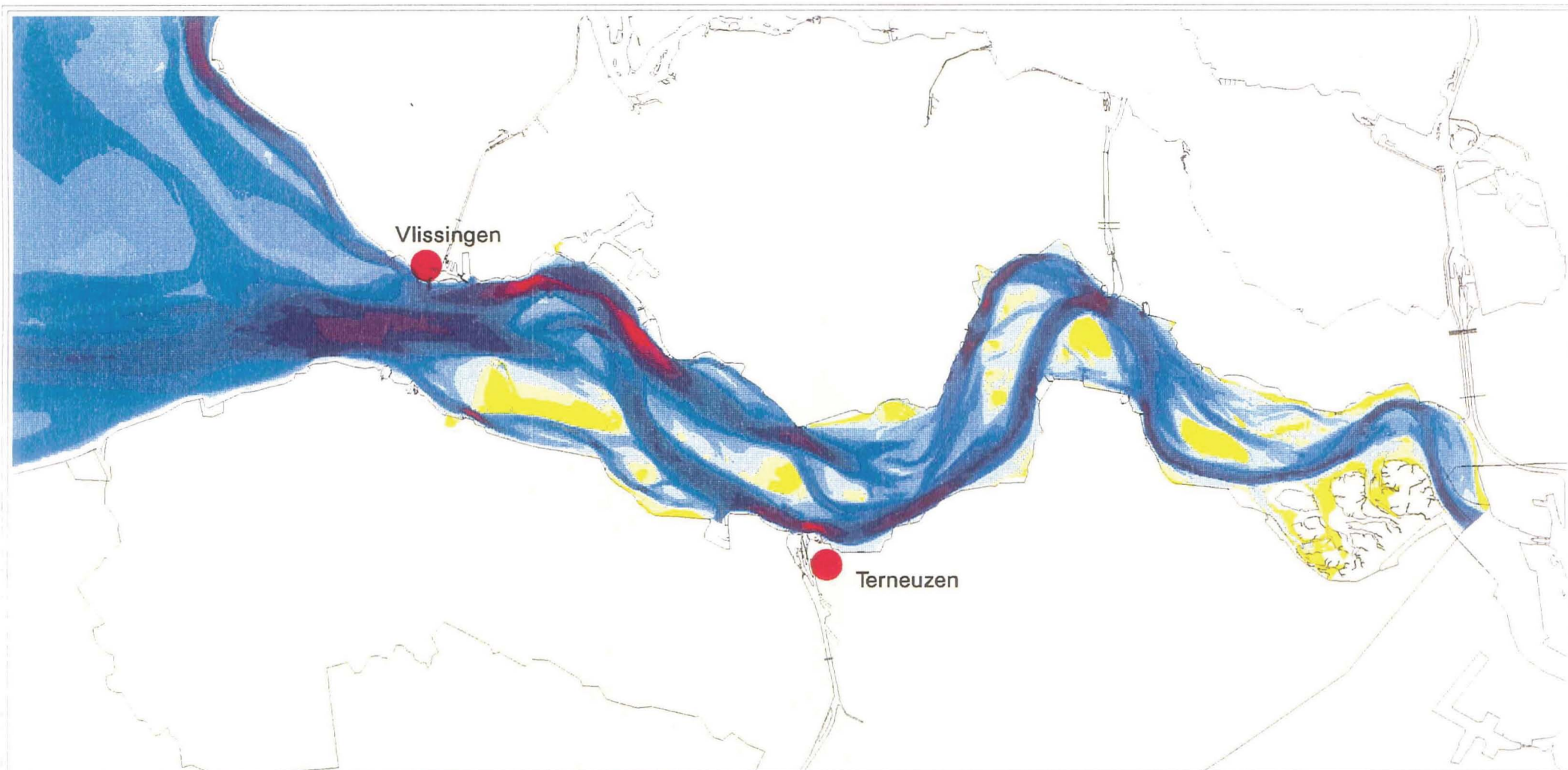
$$\hat{u}_0 = \frac{\omega H}{2 \sinh(kd)} \quad (I.6)$$

De horizontale orbitaalverplaatsing ζ is gelijk aan u_0/ω . Voor de maximale horizontale verplaatsing aan de bodem \hat{a}_0 geldt:

$$\hat{a}_0 = \frac{H}{2 \sinh(kd)} \quad (I.7)$$

De grootte van de parameter \hat{a}_0 is mede bepalend voor het sedimenttransport.

BIJLAGEN



Diepte in dm: -300 t/m -250 -125 t/m -100 0 t/m 10

< -450 -250 t/m -200 -100 t/m -75 10 <

-450 t/m -400 -200 t/m -175 -75 t/m -50

-400 t/m -350 -175 t/m -150 -50 t/m -25

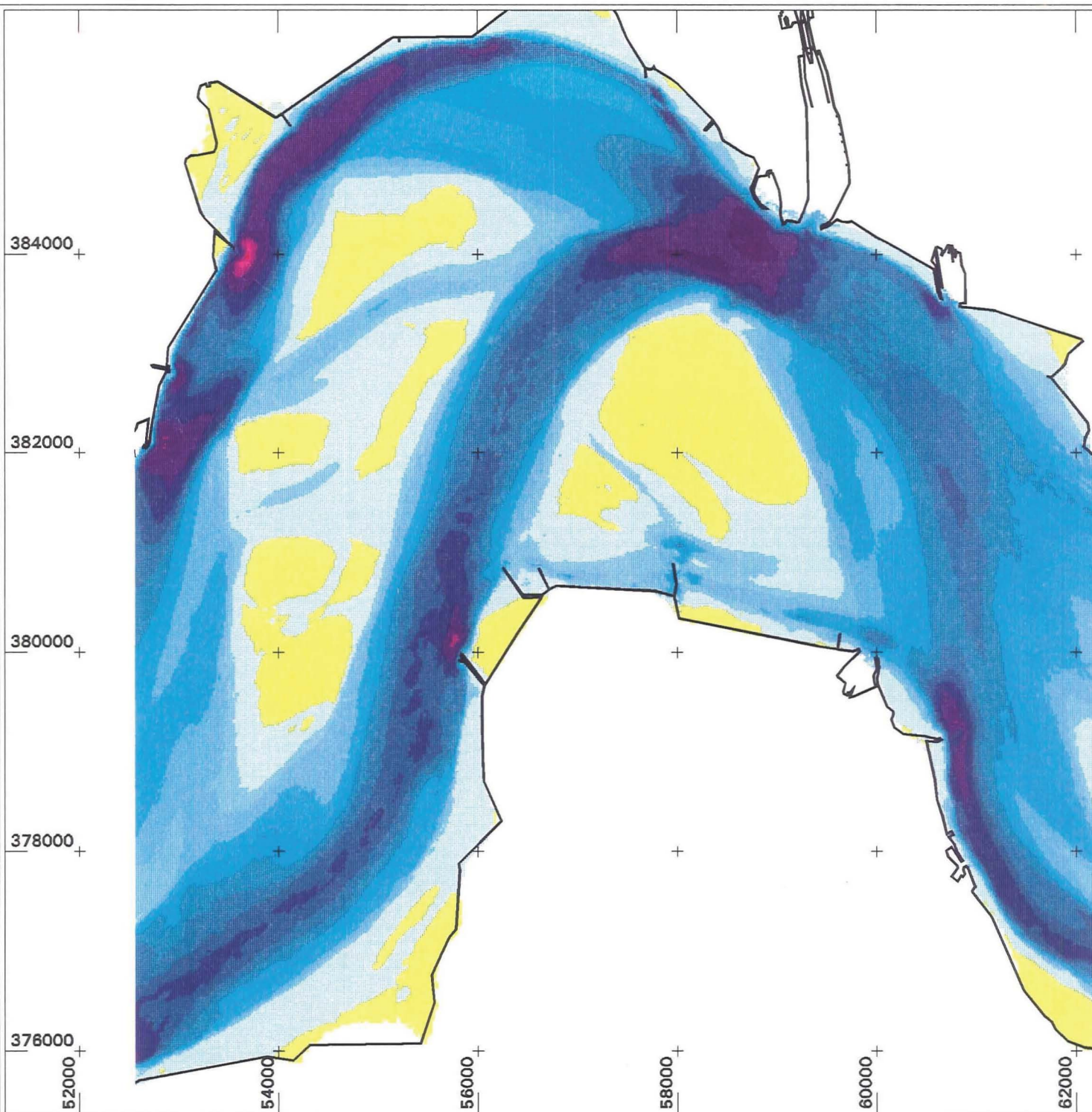
-350 t/m -300 -150 t/m -125 -25 t/m 0

Dieptekaart
Westerschelde
1996

Bijlage A

RWS Directie Zeeland, afd. AXI
30-JUN-1997



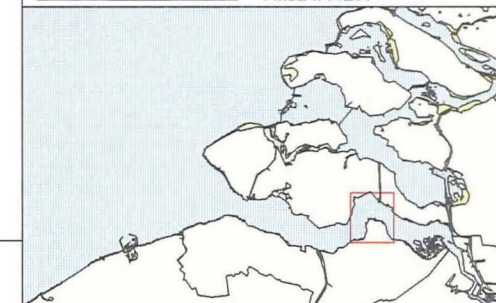


Legenda

■	dieper dan -45 m
■	-45 tot -40 m
■	-40 tot -35 m
■	-35 tot -30 m
■	-30 tot -25 m
■	-25 tot -20 m
■	-20 tot -17.5 m
■	-17.5 tot -15 m
■	-15 tot -12.5 m
■	-12.5 tot -10 m
■	-10 tot -7.5 m
■	-7.5 tot -5 m
■	-5 tot -2.5 m
■	-2.5 tot N.A.P.
■	N.A.P. tot 10 m

0 1500 m.

Schaal 1: 56254



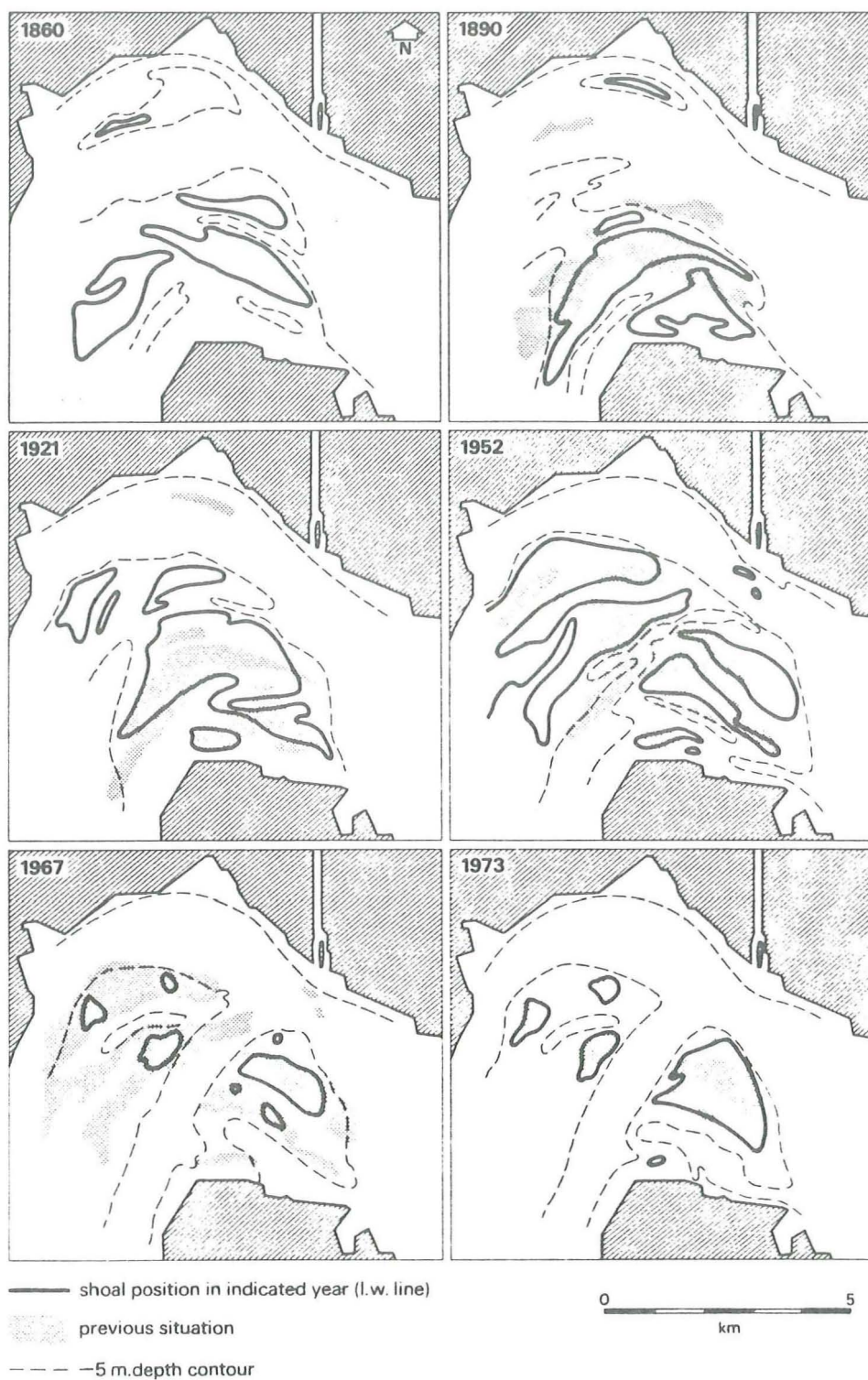
Dieptekaart

Platen van Ossenis 1996

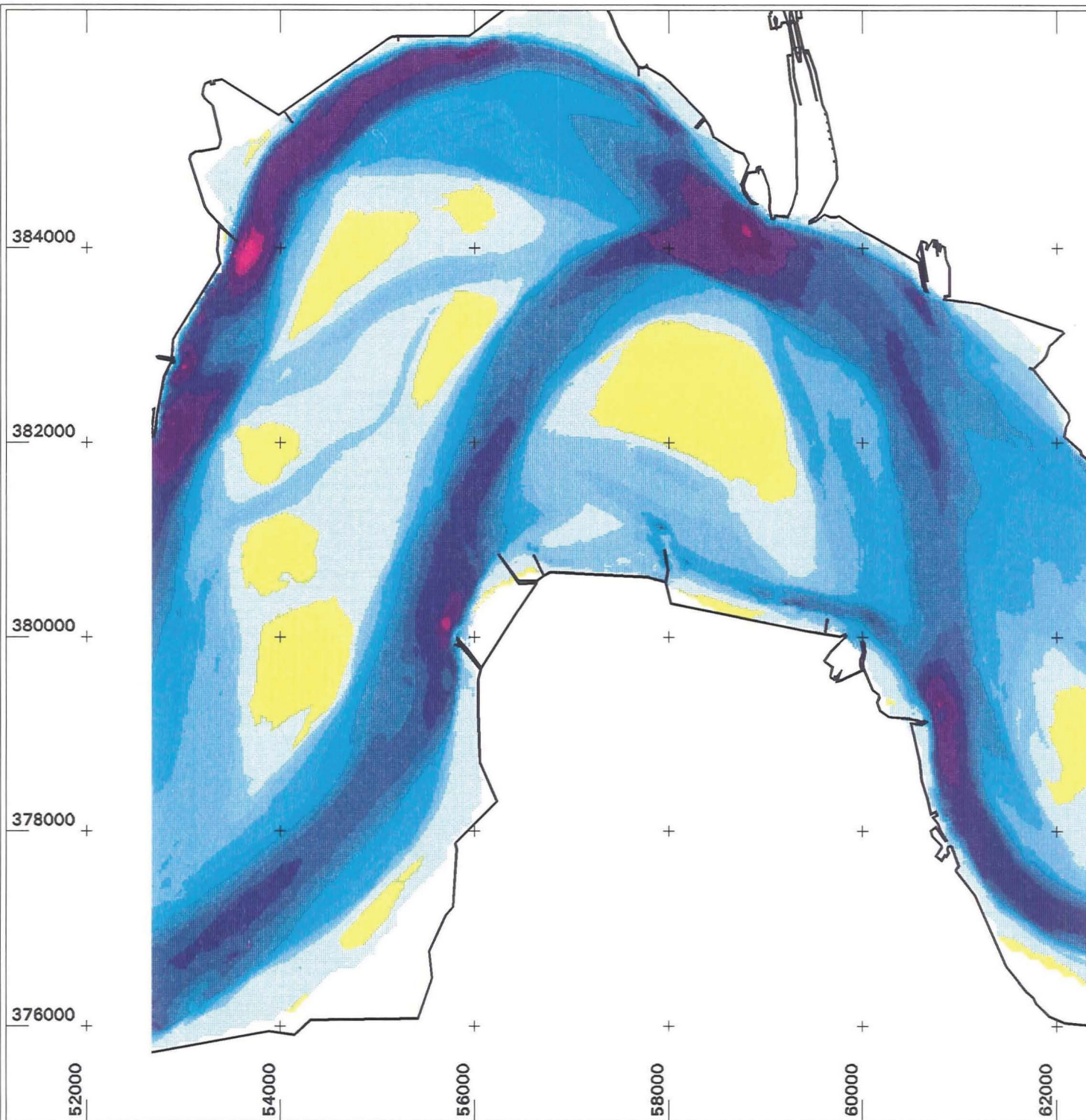
BIJLAGE B1

RWS Directie Zeeland, afd. NWL

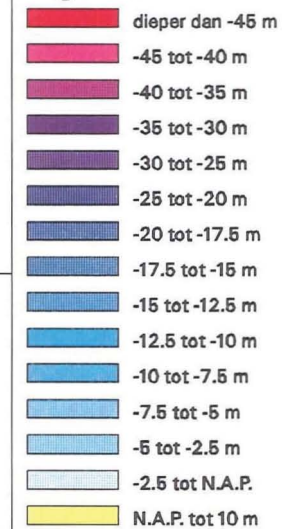




Historisch overzicht van de Platen van Ossensisse (naar Boersma en Terwindt).

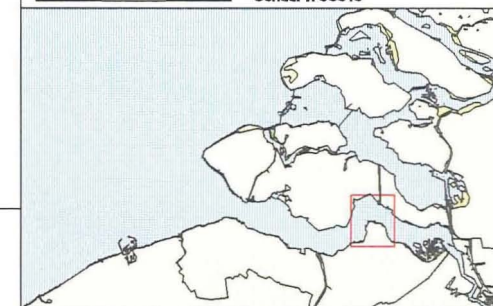


Legenda



0 1500 m.

Schaal 1: 58010



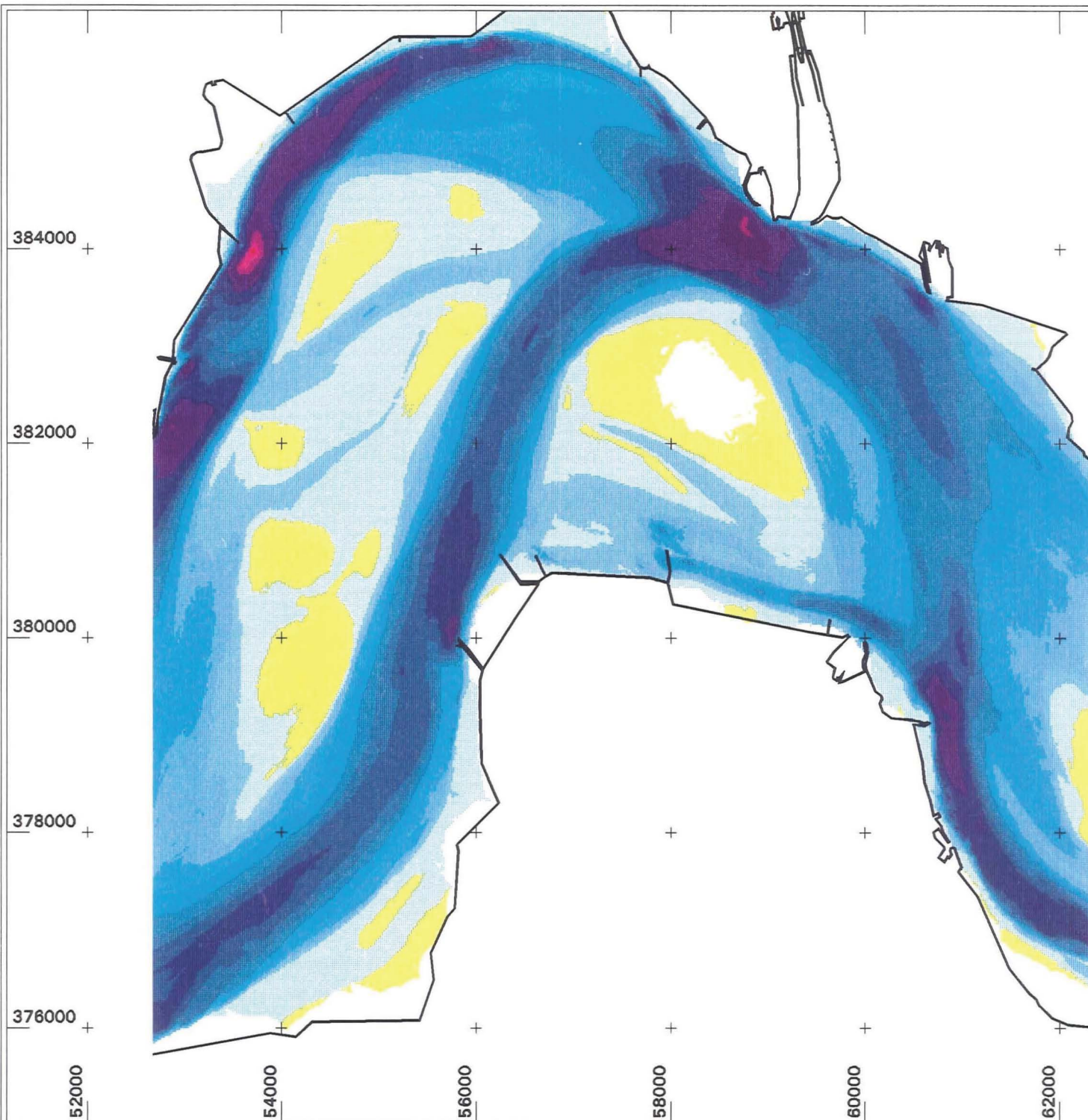
Dieptekaart

Platen van Ossenisse 1982

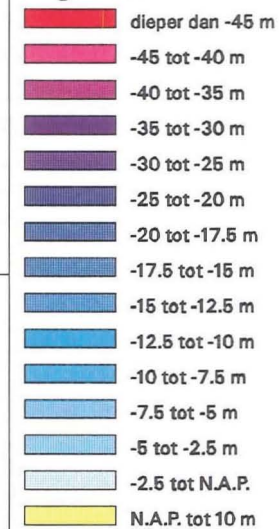
BIJLAGE D1

RWS Directie Zeeland, afd. NWL

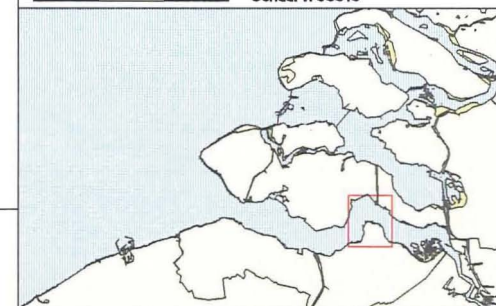




Legenda



0 1500 m. Schaal 1: 58010



Dieptekaart

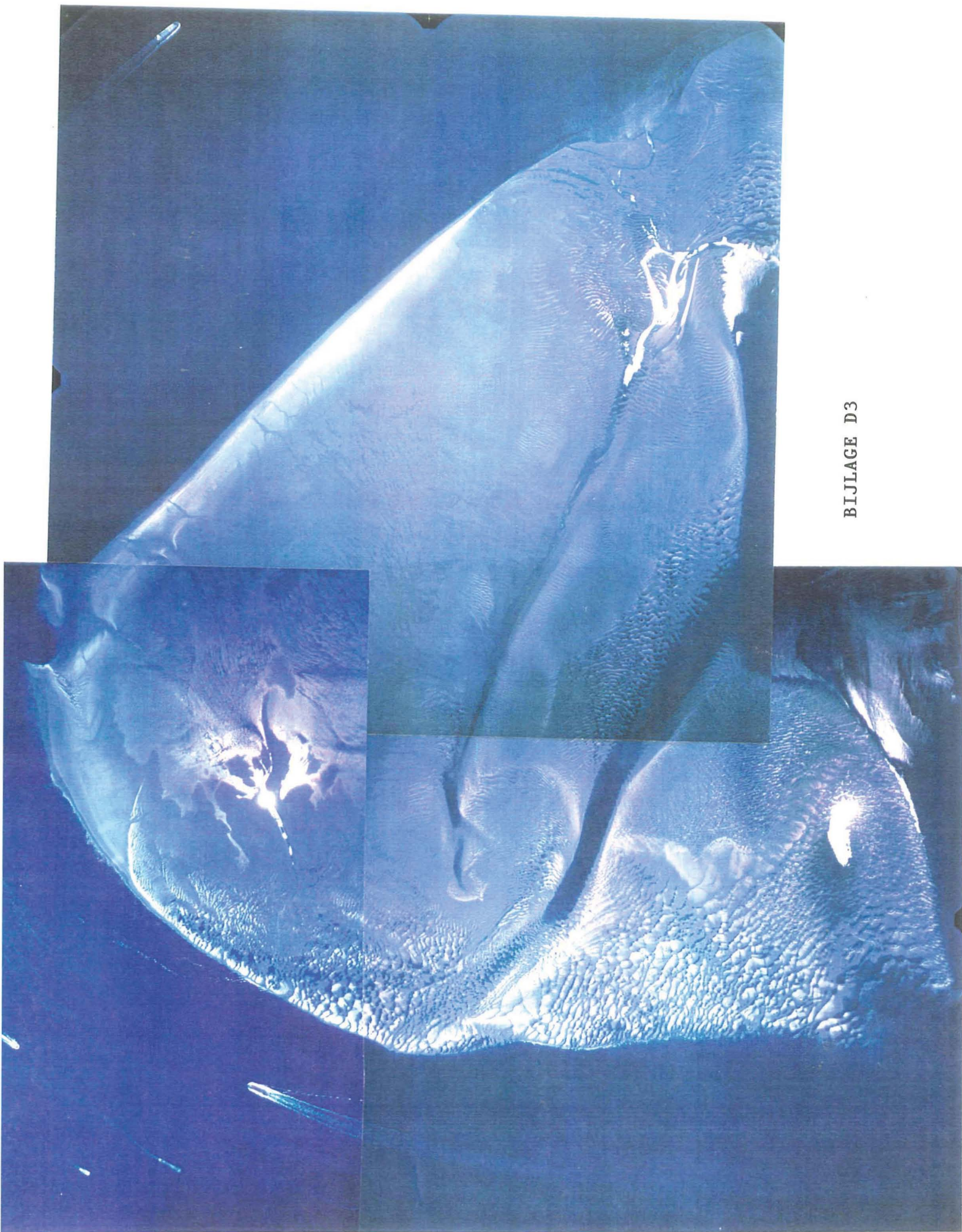
Platen van Ossensisse 1988

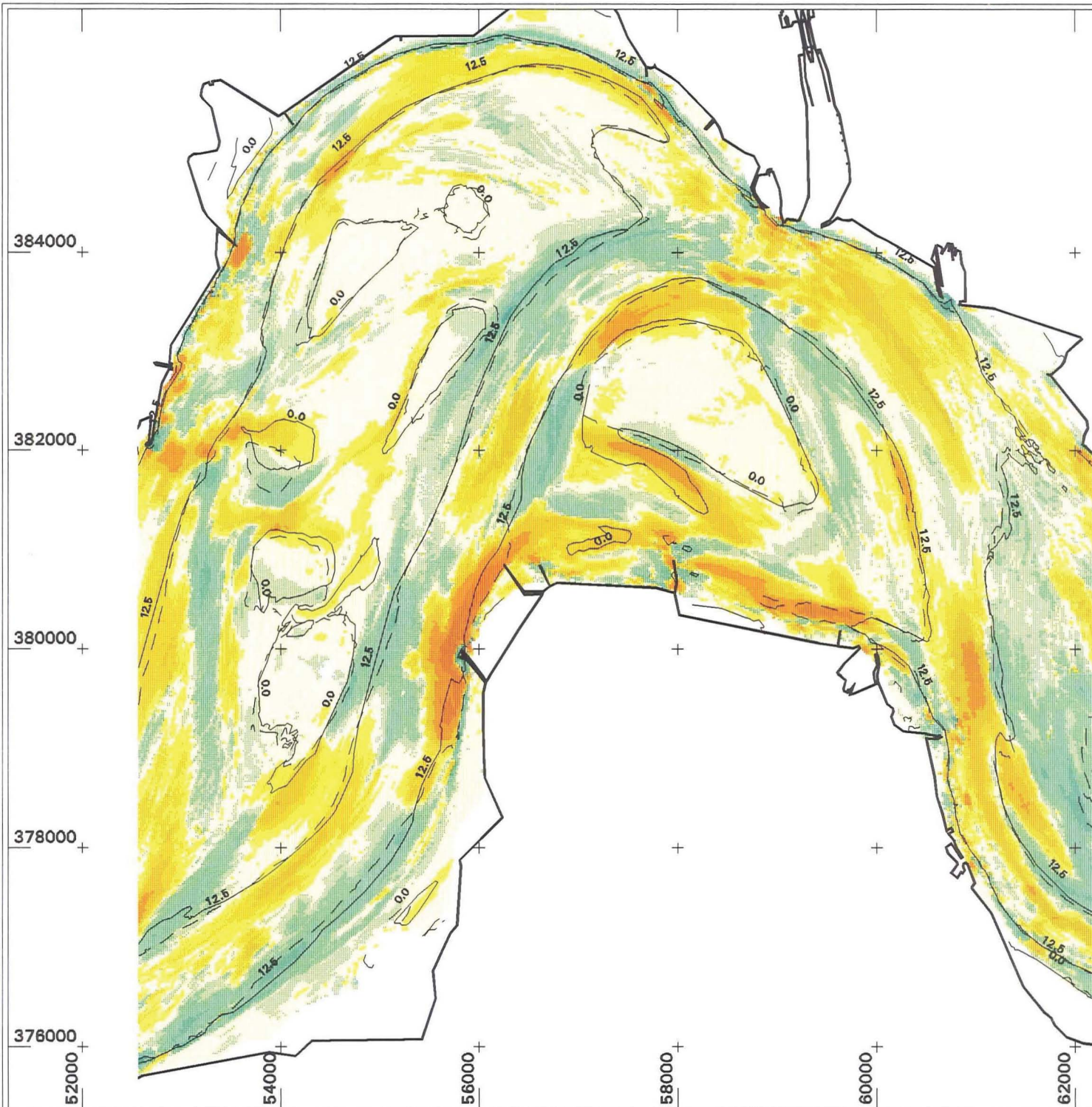
BIJLAGE D2

RWS Directie Zeeland, afd. NWL



BIJLAGE D3



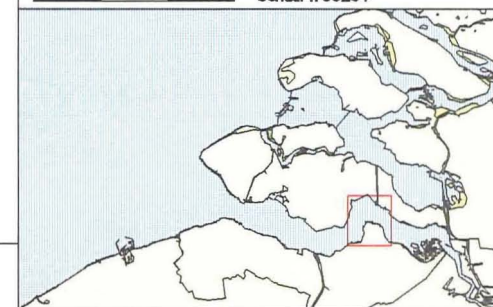


Legenda

- meer dan 8 m erosie
- 4 tot 8 m
- 2 tot 4 m
- 1 tot 2 m
- 0.4 tot 1 m erosie
- geen verschil
- 0.4 tot 1 m sedimentatie
- 1 tot 2 m
- 2 tot 4 m
- 4 tot 8 m
- meer dan 8 m sedimentatie
- Dieptelijn 1990_1
- Dieptelijn 1986_1

0 1500 m.

Schaal 1: 56254

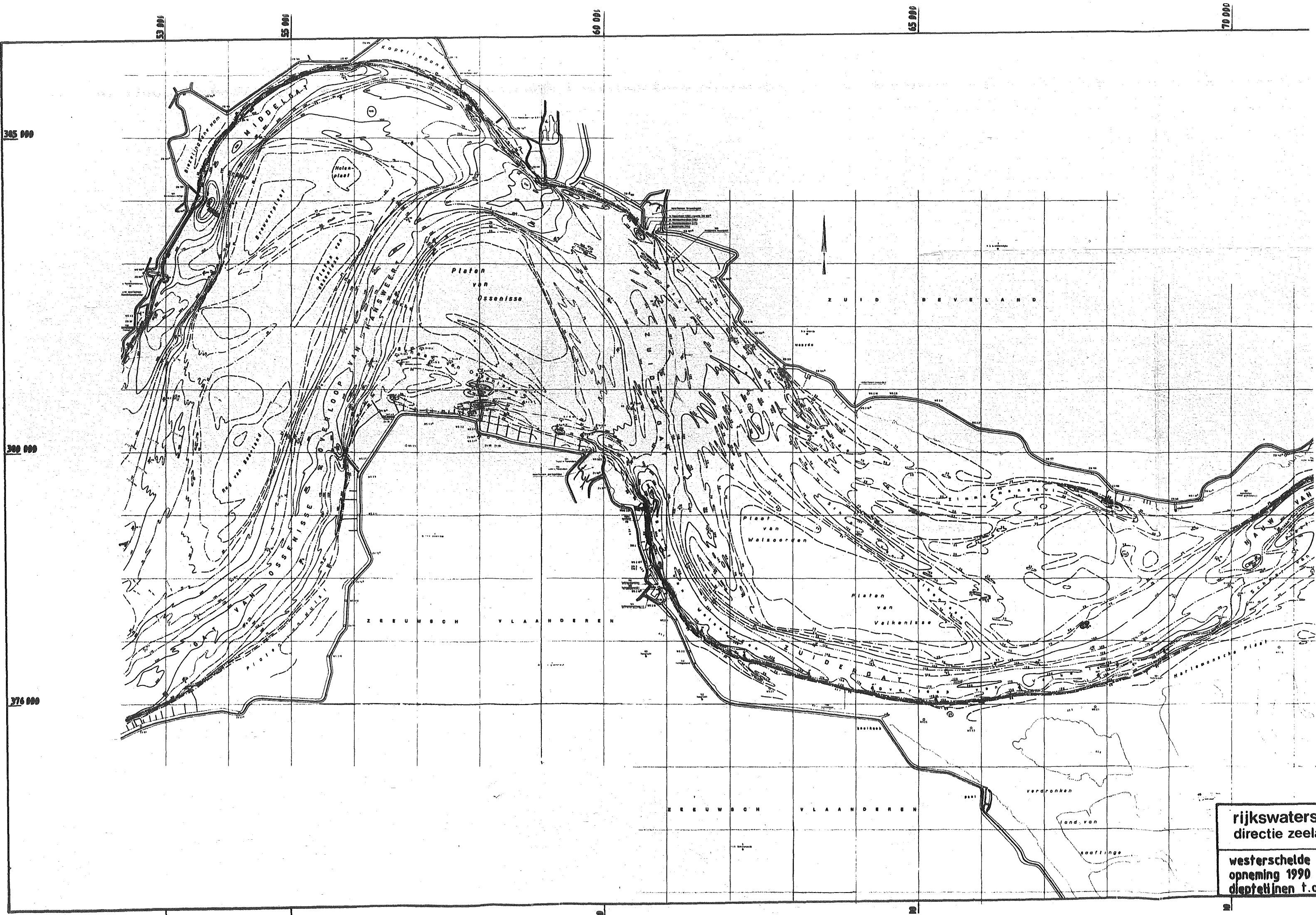


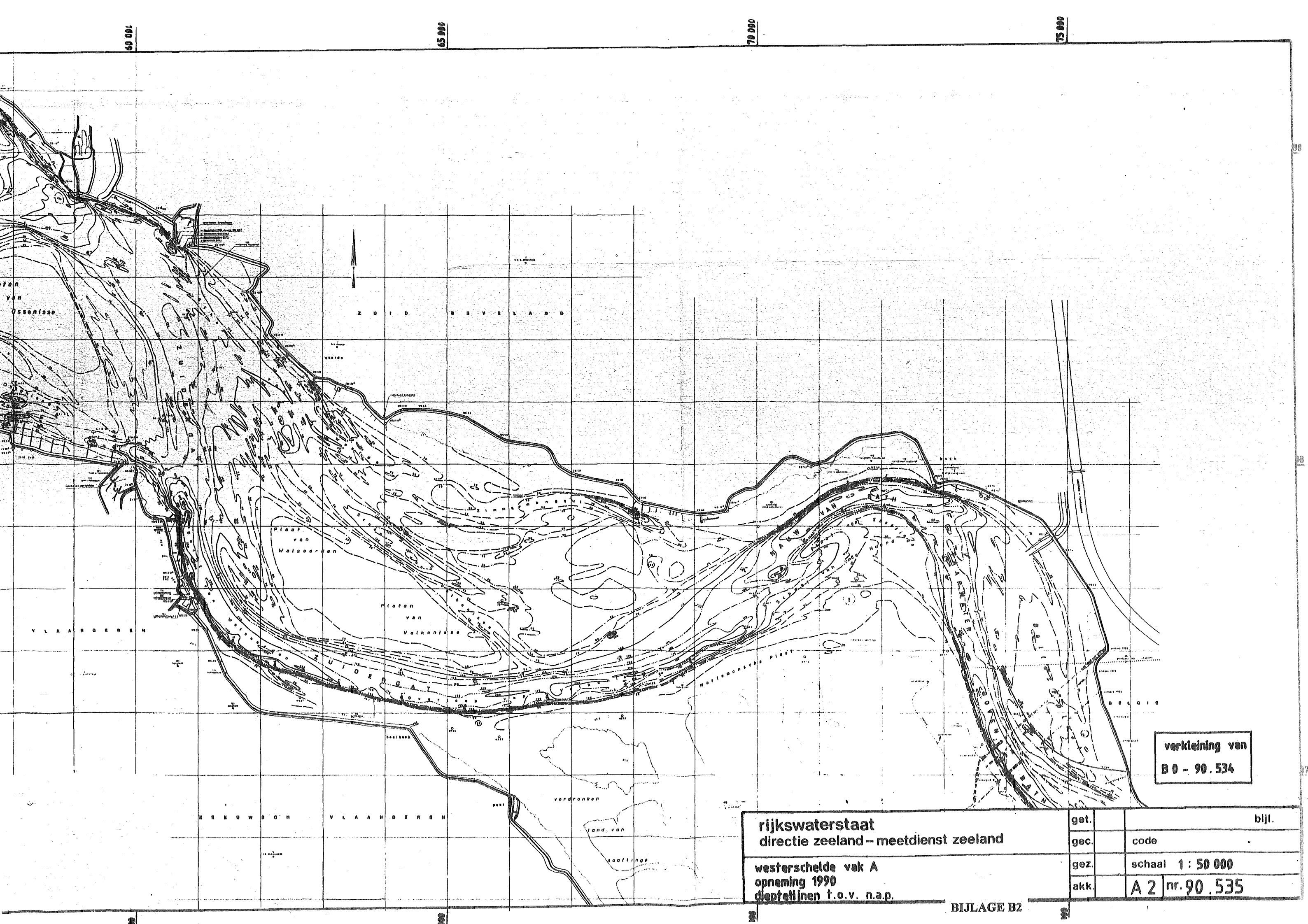
Verschilkaart Platen van Ossenisse 1986-1990

BIJLAGE Z

RWS Directie Zeeland, afd. NWL





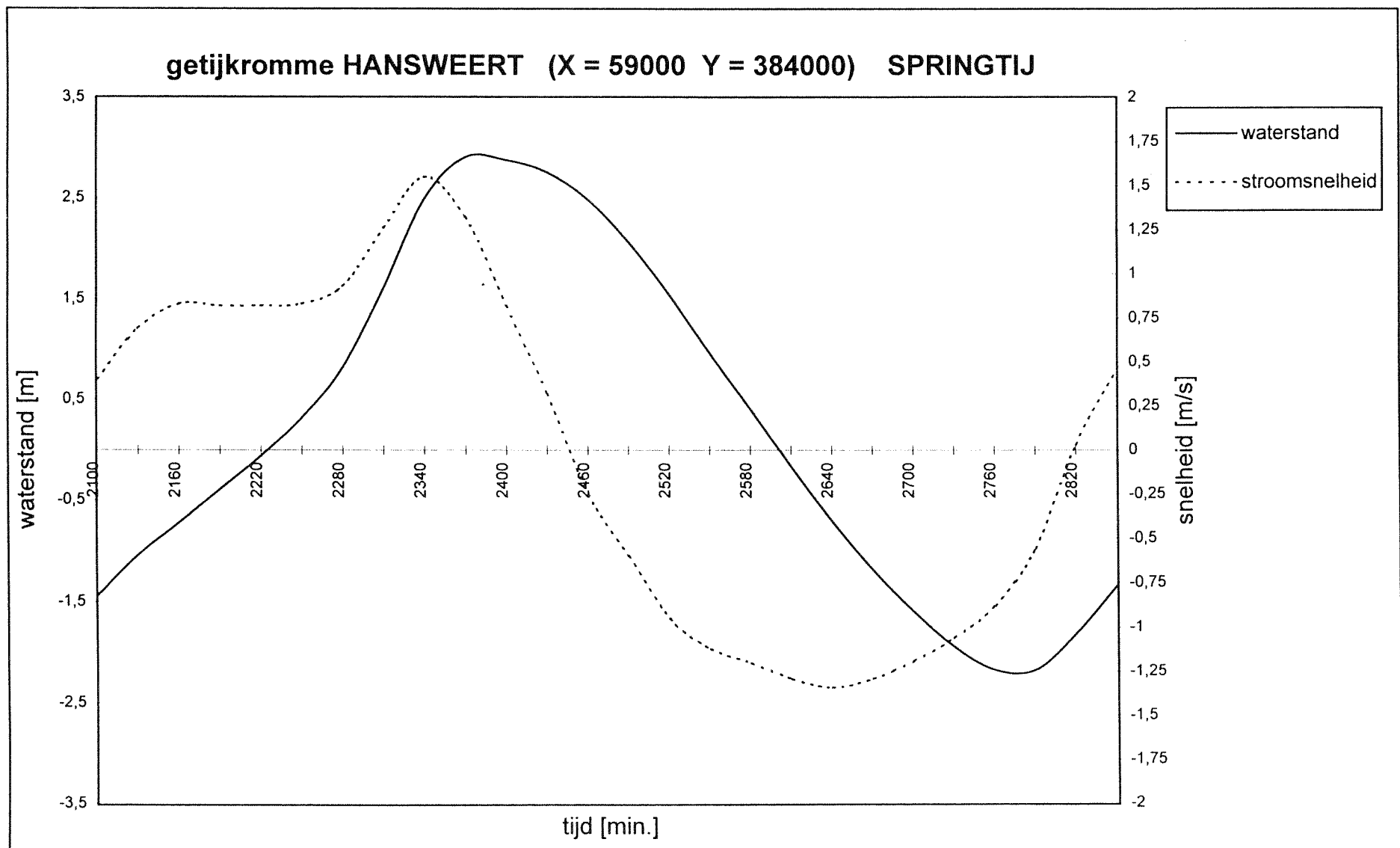


verkleining van
B 0 - 90.534

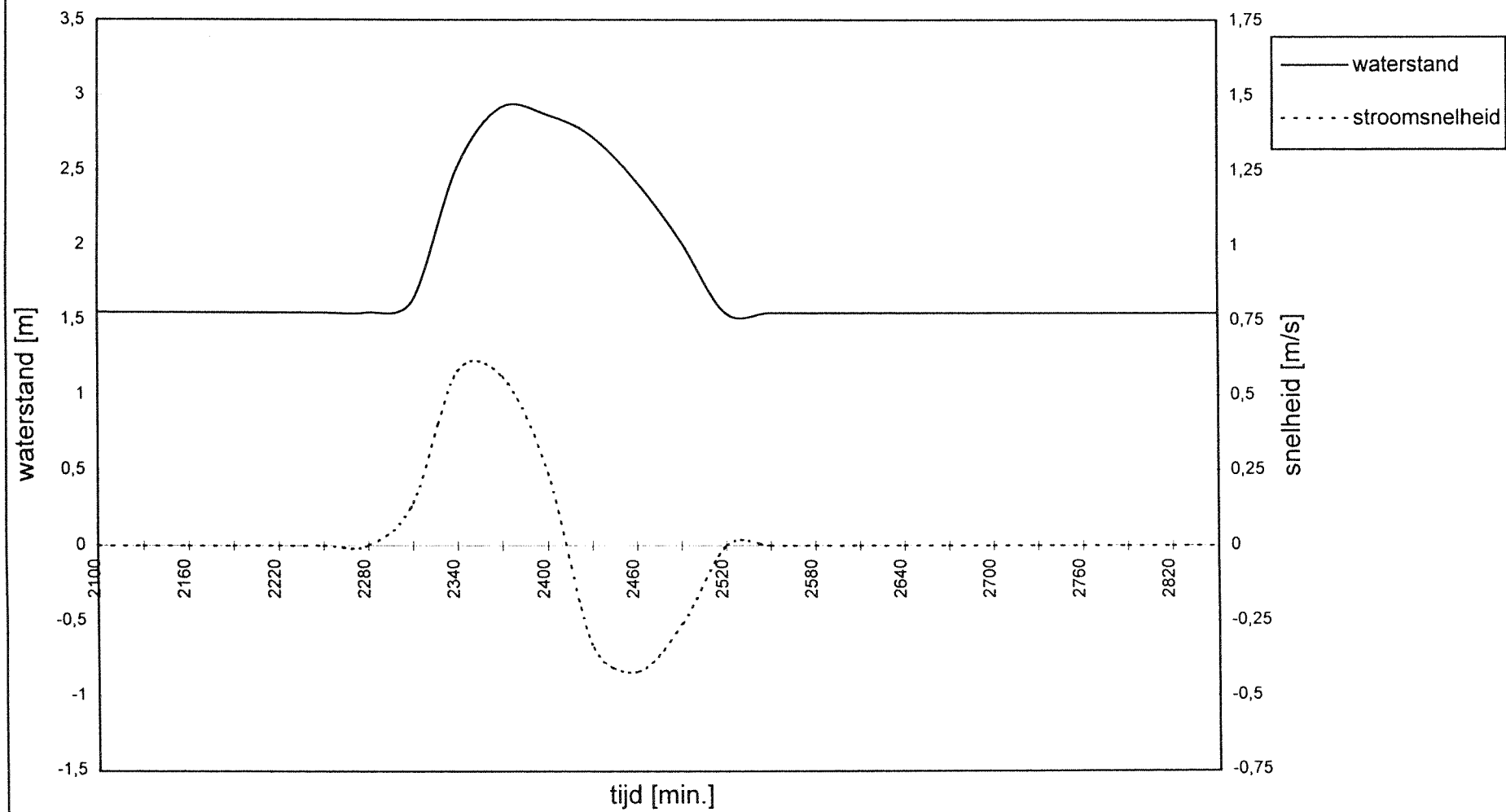
rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst zeeland

westerschelde vak A
opneming 1990
dieptelinen t.o.v. n.a.p.

get.		bijl.
gec.	code	
gez.	schaal 1 : 50 000	
akk.	A 2	nr. 90.535



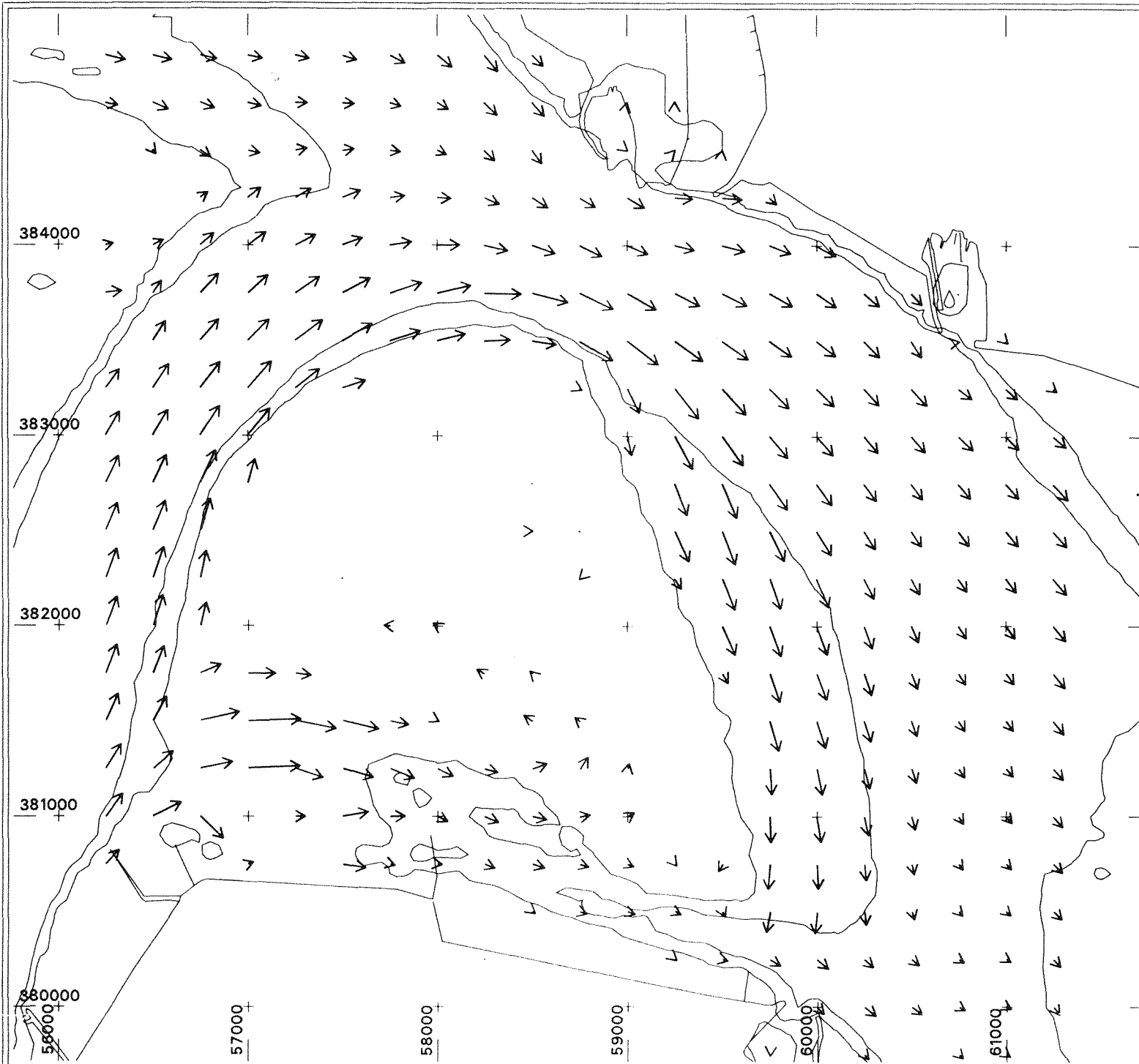
getijkromme PLAAT VAN OSSENISSE (X = 58000 Y = 382250) SPRINGTIJ



BIJLAGE F

2-DIMENSIONAAL STROOMBEELD SPRINGTIJ

VOLGENS SCALDIS-100

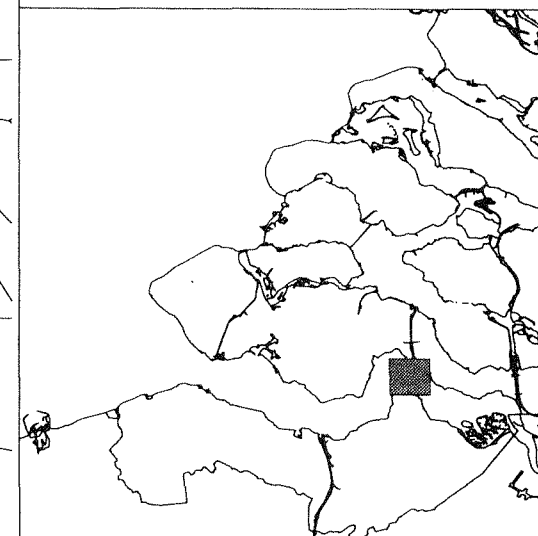


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2100g

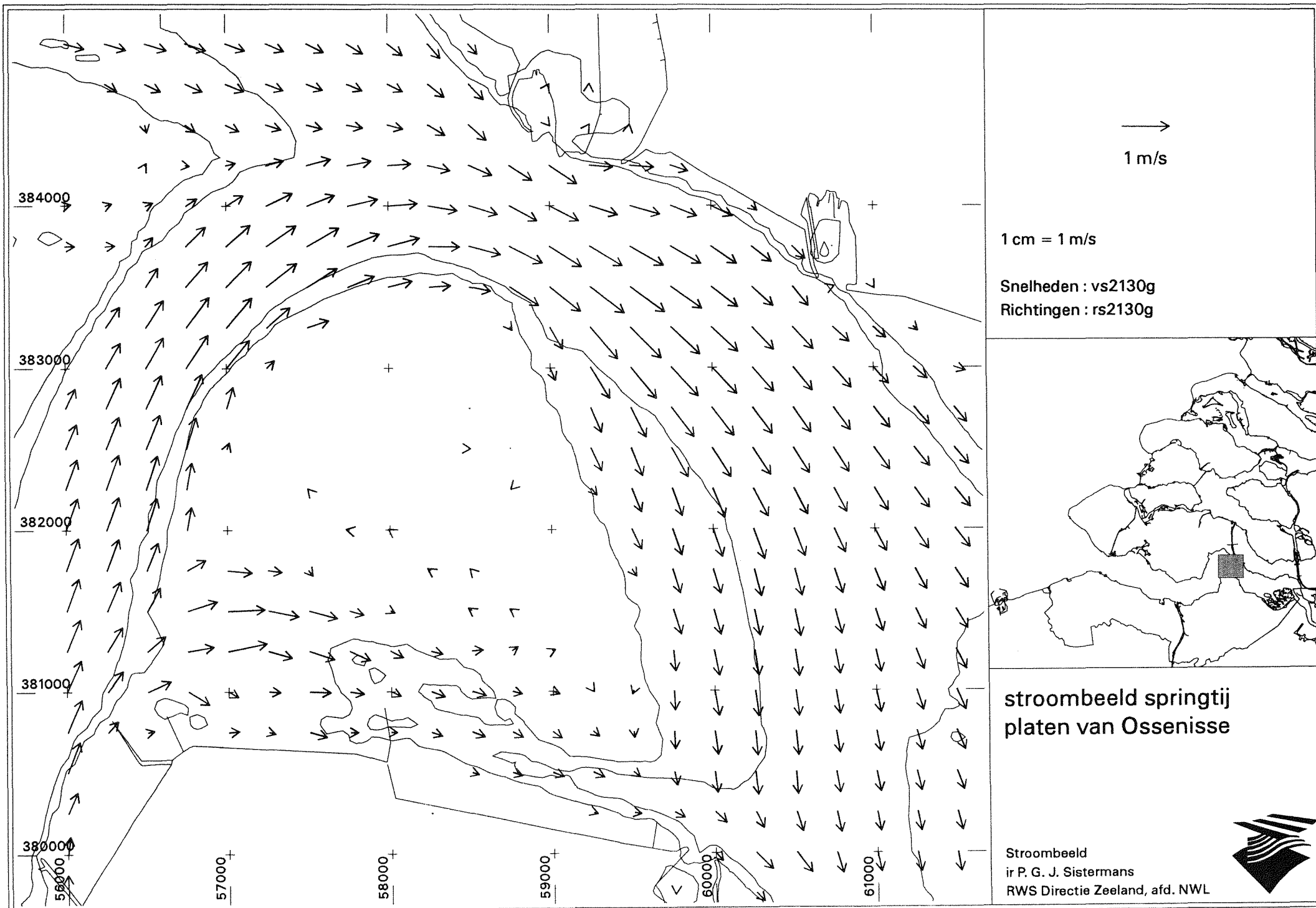
Richtingen : rs2100g

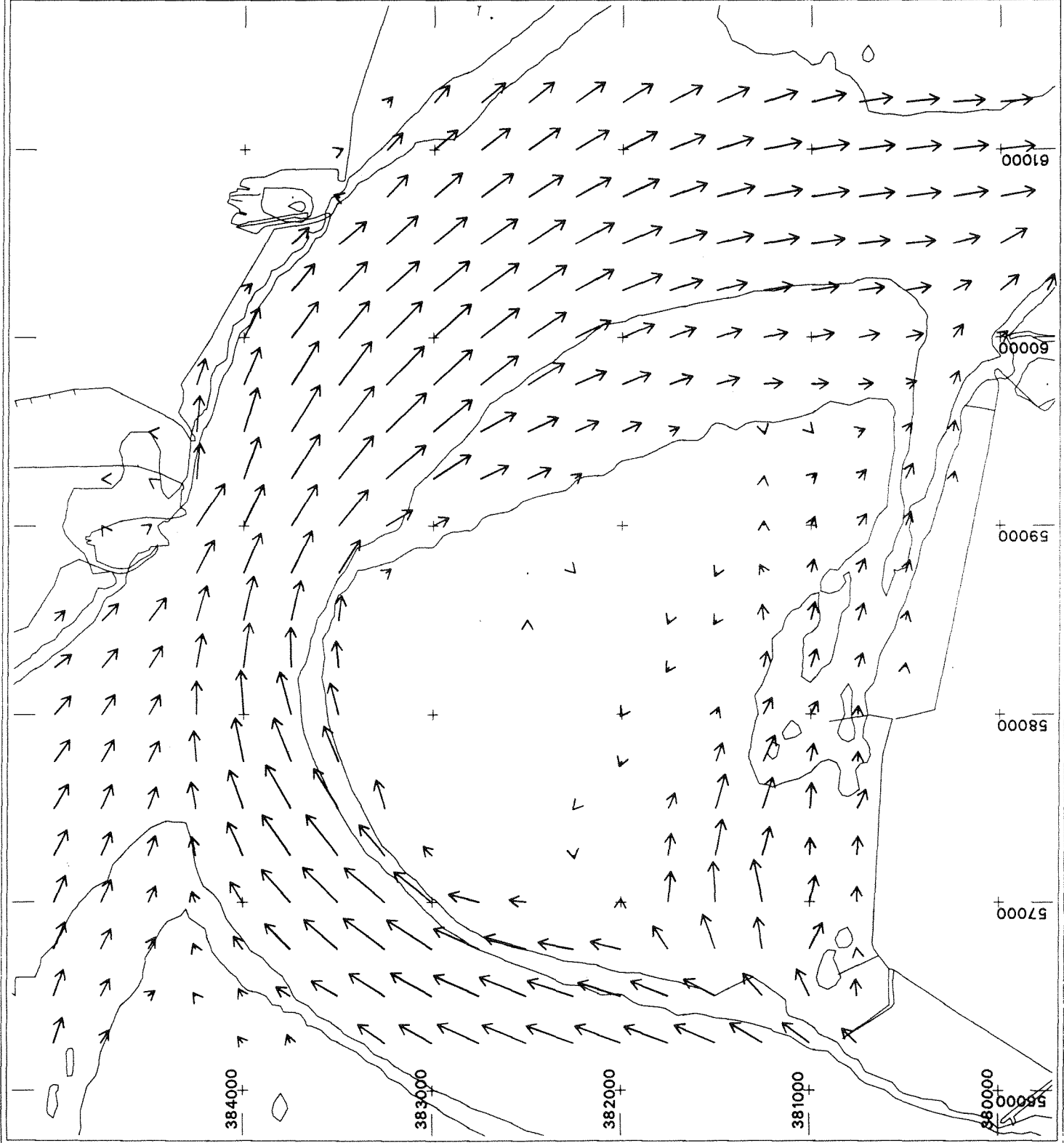


stroombeeld springtij
platen van Ossenis

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



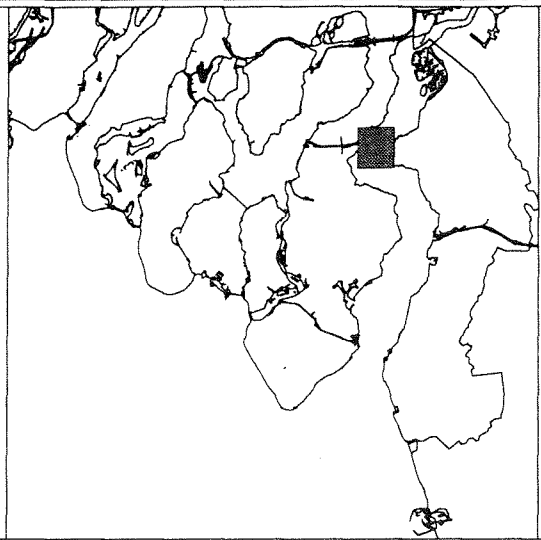




→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

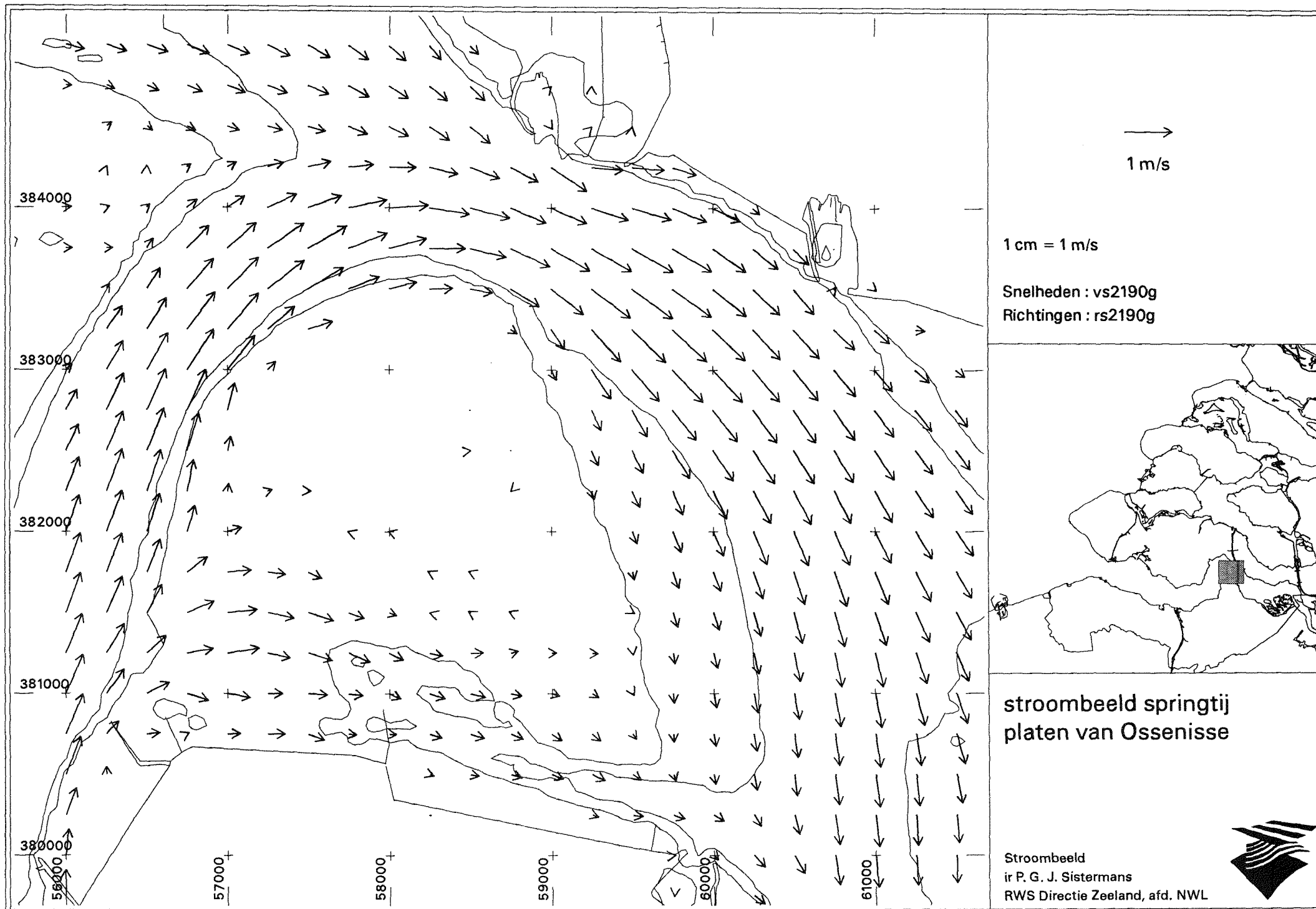
Snelheden : vs2160g
Richtingen : rs2160g

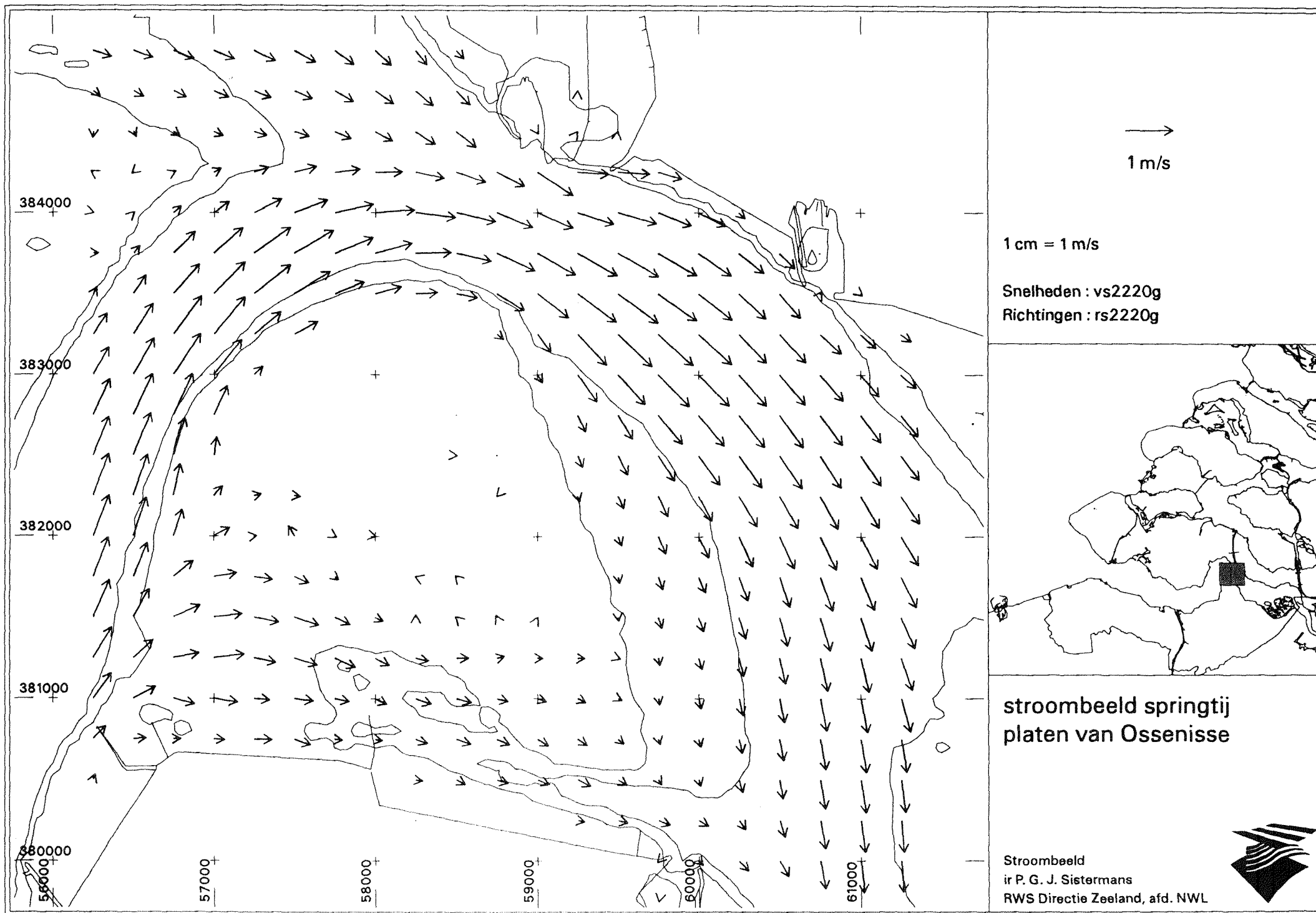


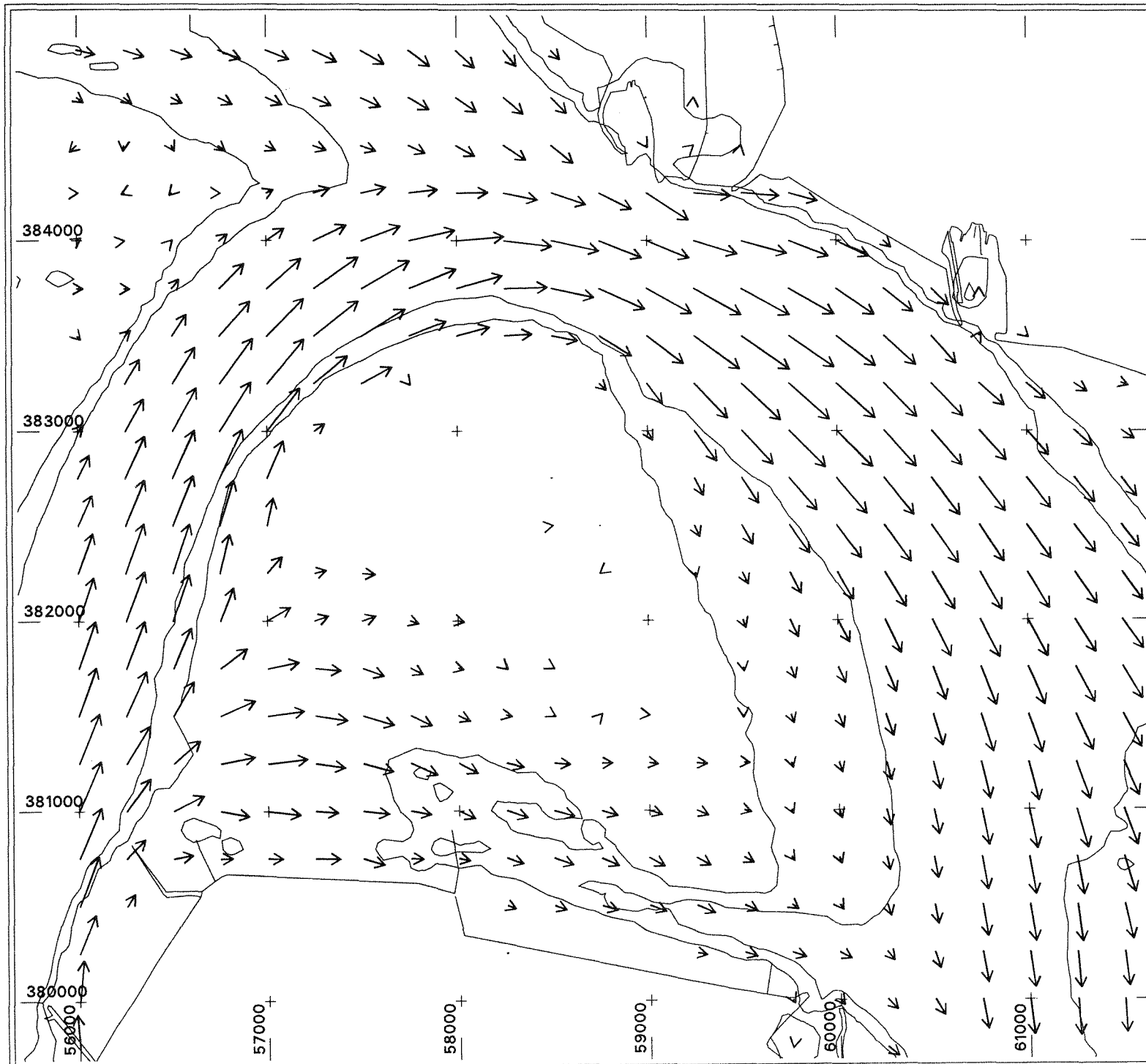
stroombeeld springtij platen van Ossensisse



Stroombeeld
ir P. G. J. Sistemans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL





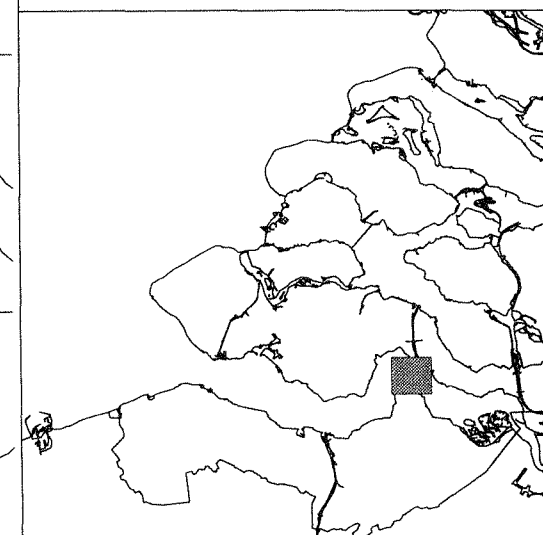


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2250g

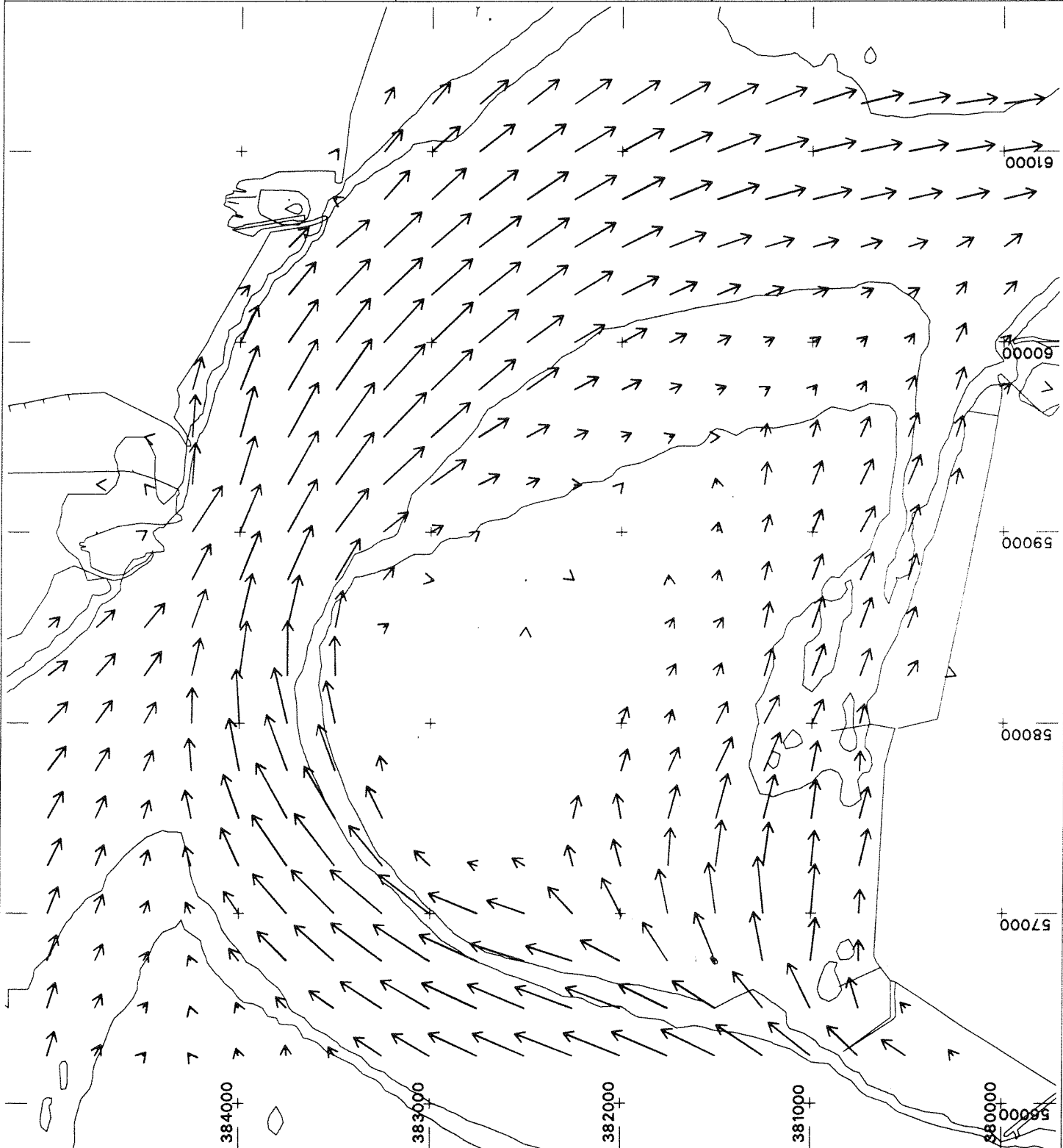
Richtingen : rs2250g



**stroombeeld springtij
platen van Ossenis**

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL

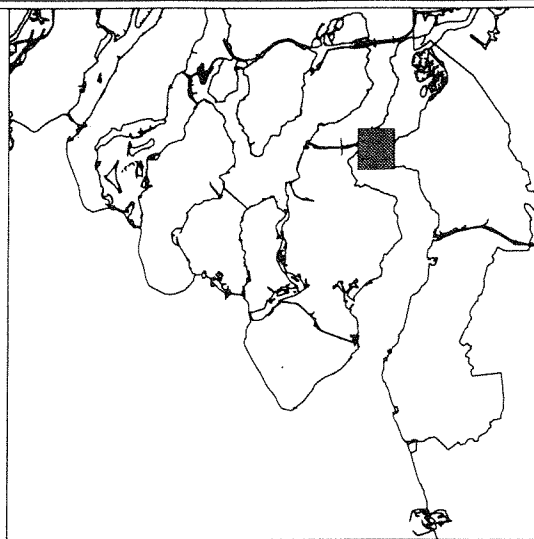




↑
1 m/s

1 cm = 1 m/s

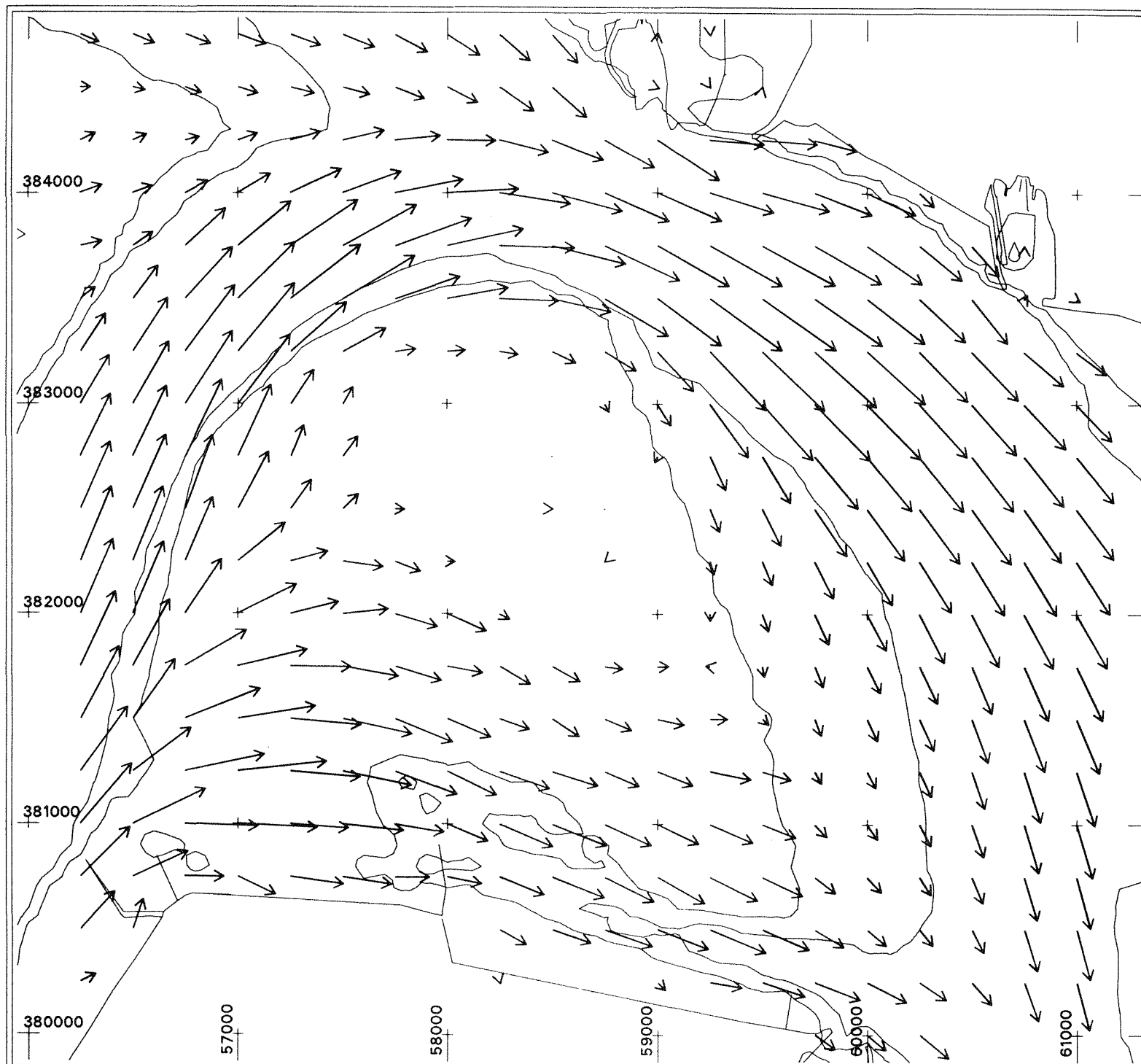
Snelheden : vs2280g
Richtingen : rs2280g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse



Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL

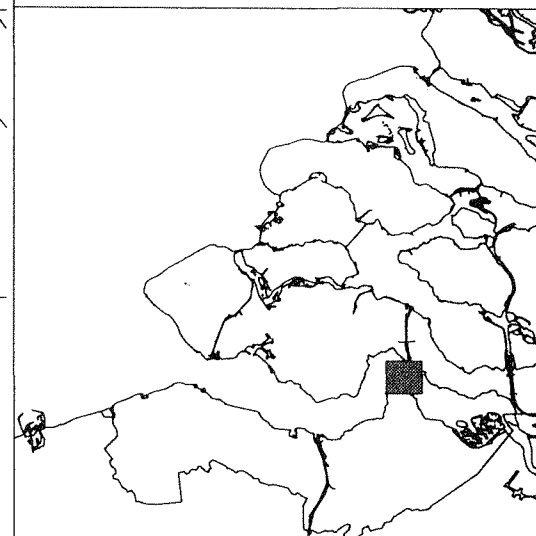


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2310g

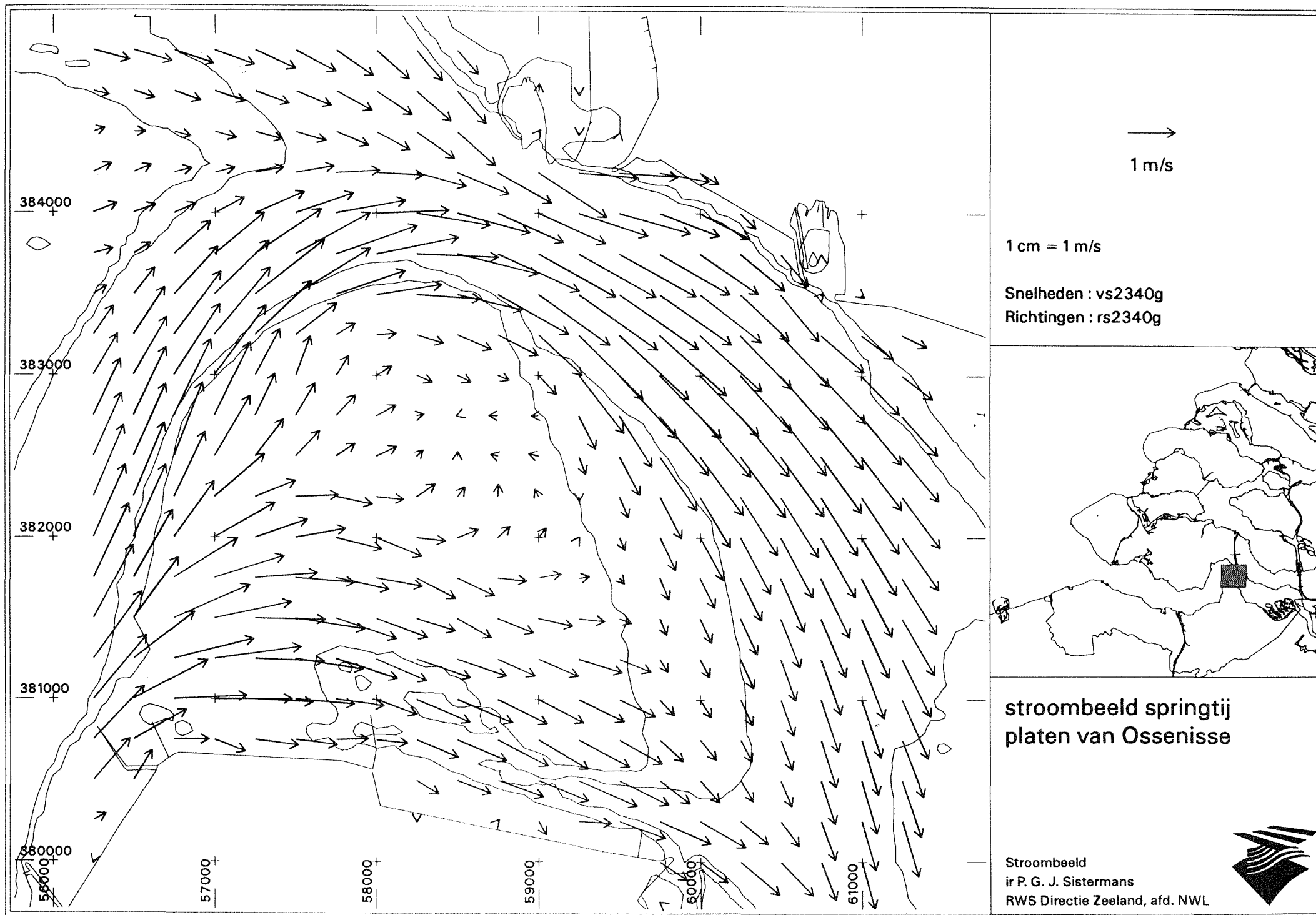
Richtingen : rs2310g

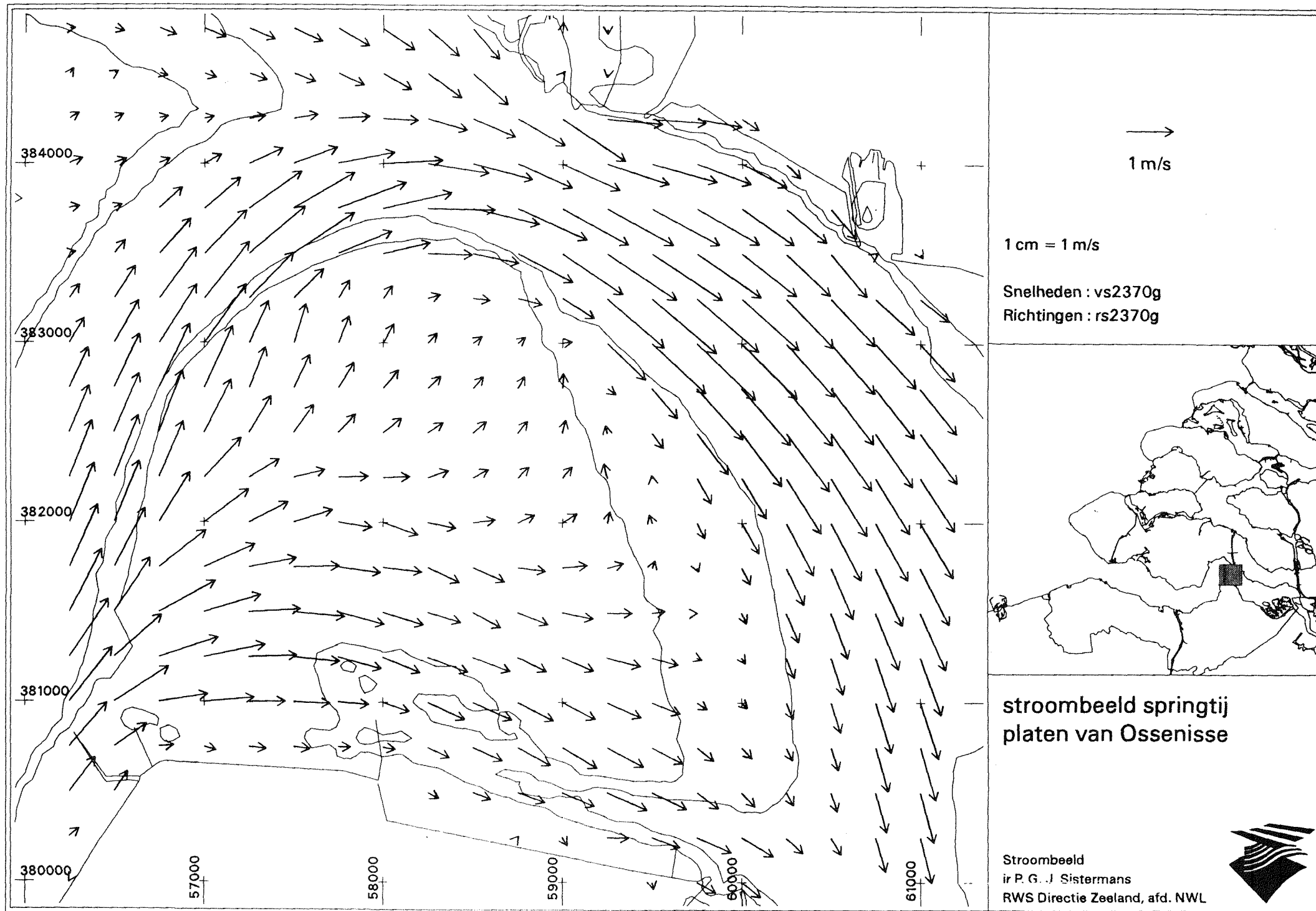


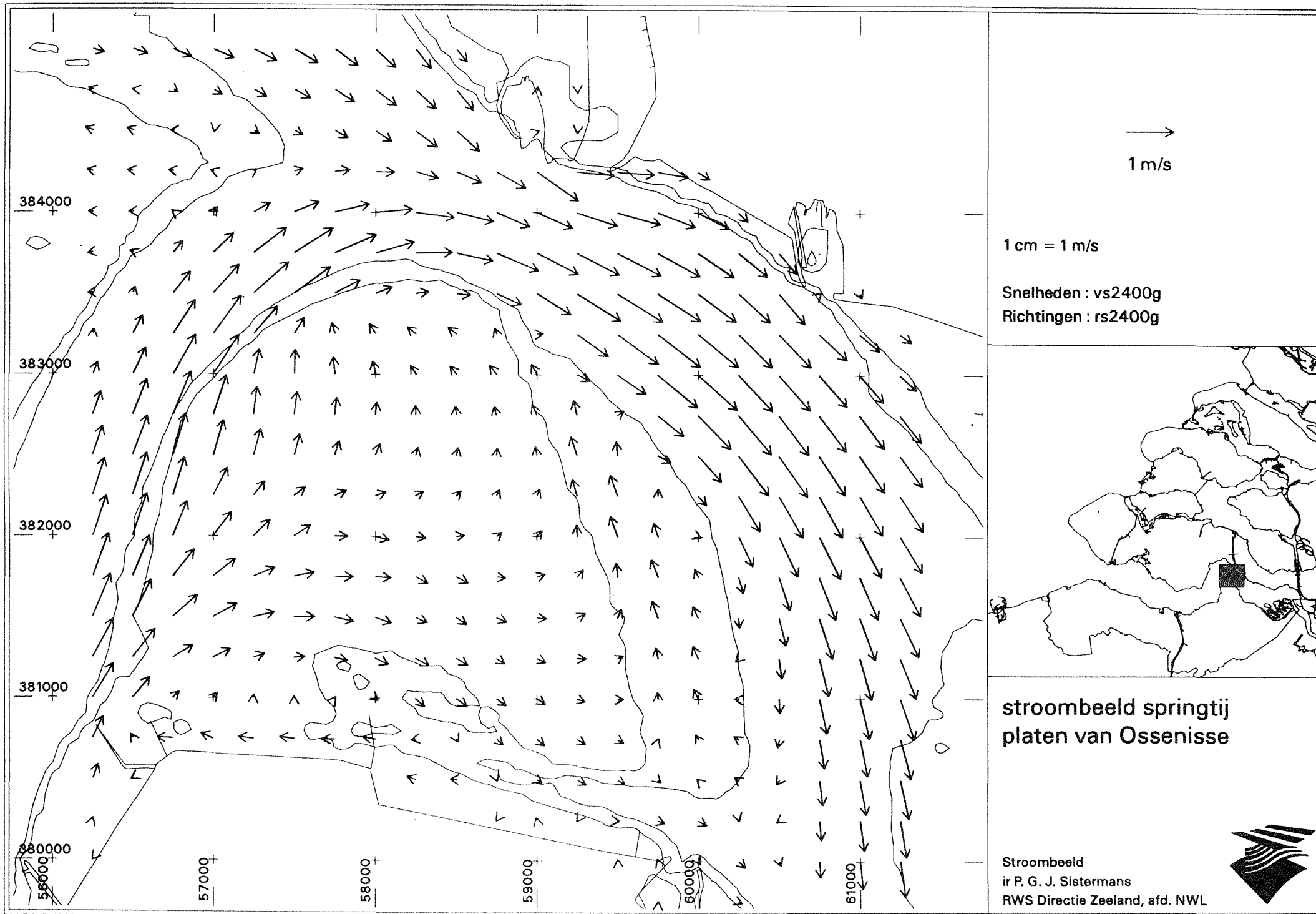
stroombeeld springtij
platen van Ossenis

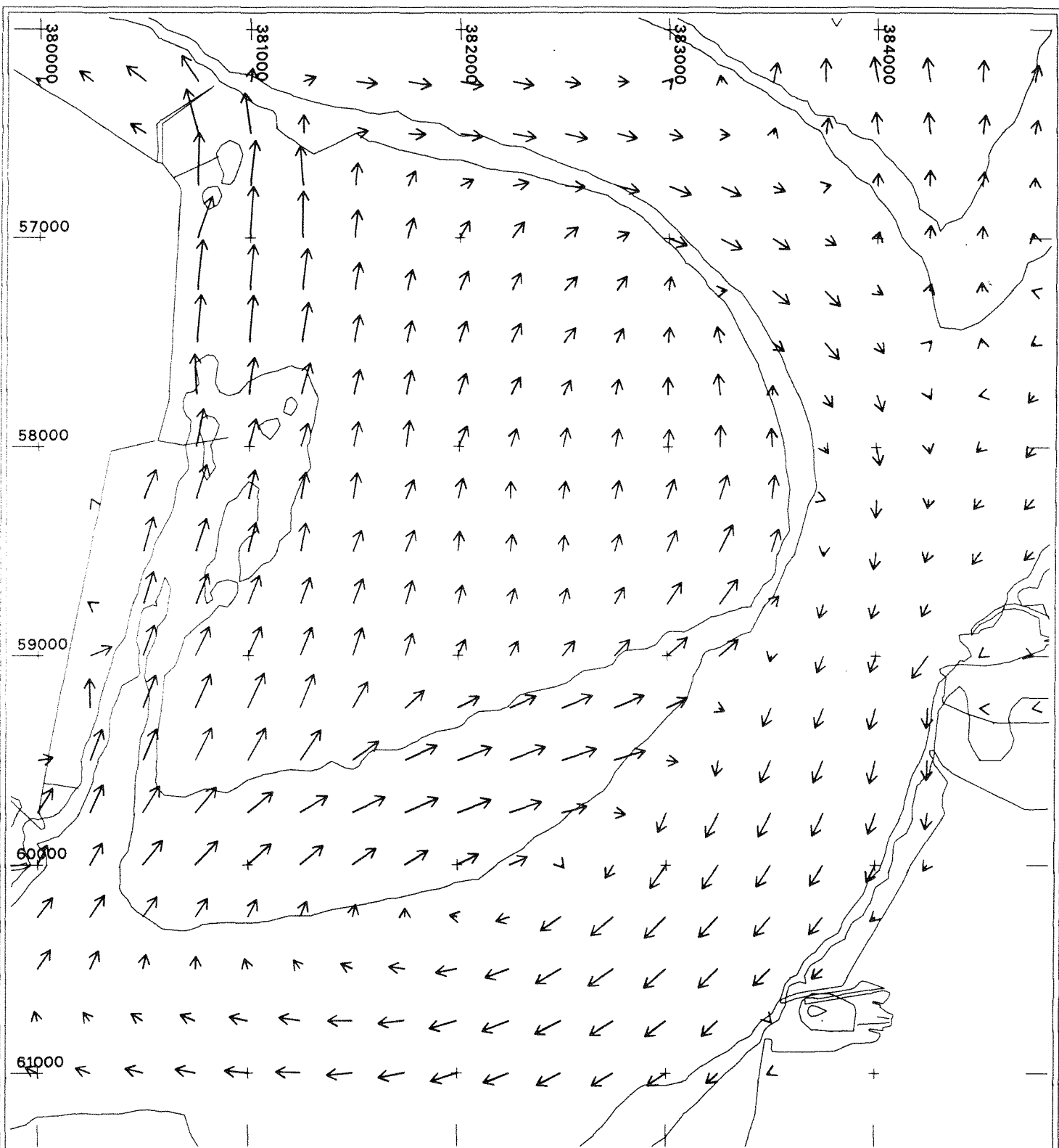
Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL







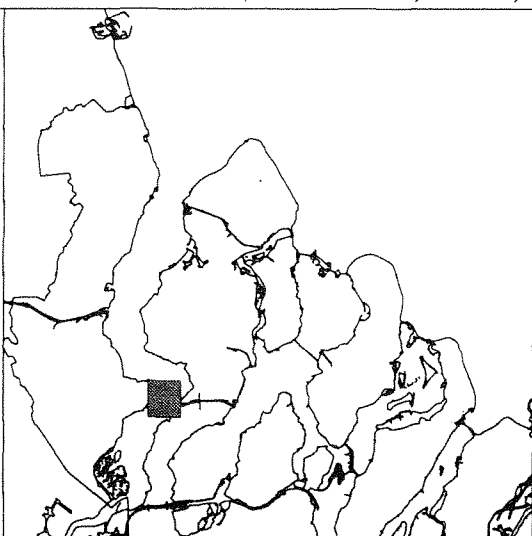




→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

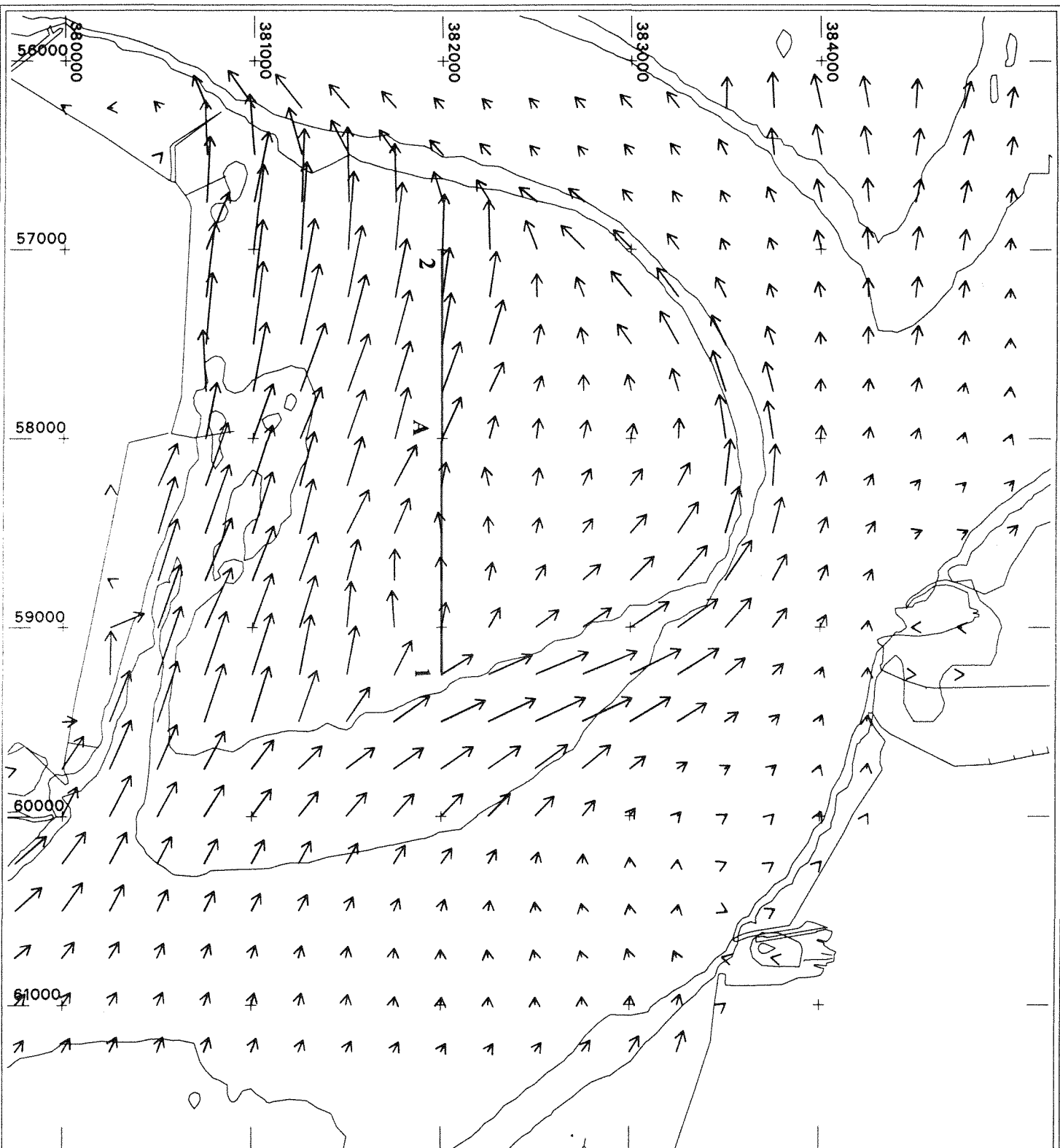
Snelheden : vs2430g
Richtingen : rs2430g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sijstermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL

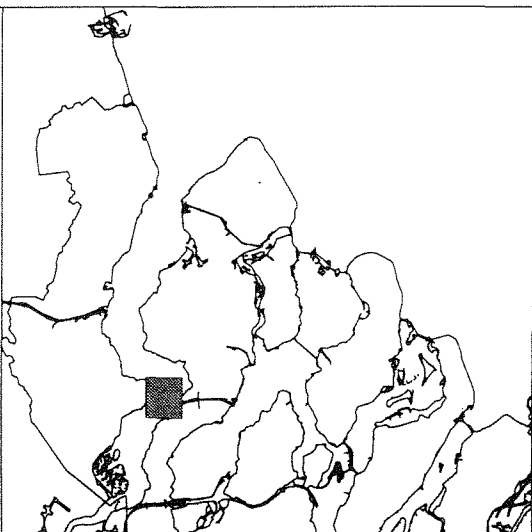




→
1 m/s

— debietraai
1 cm = 1 m/s

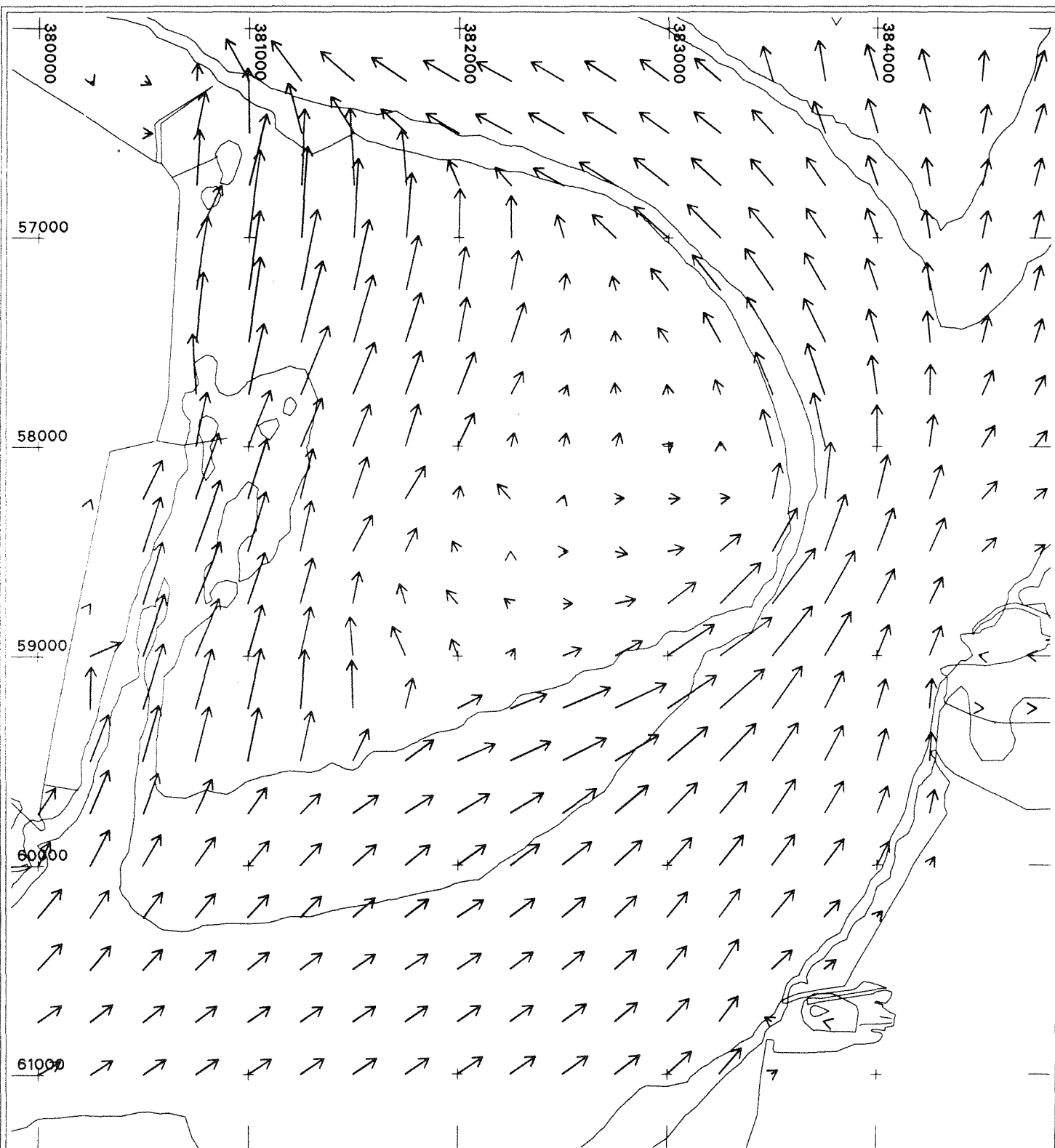
Snelheden : vs2460g
Richtingen : rs2460g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse

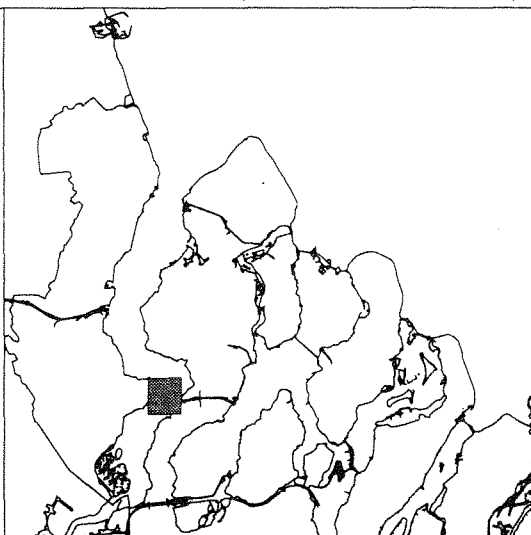
Stroombeeld
ir P. G. J. Sijstermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL





1 cm = 1 m/s

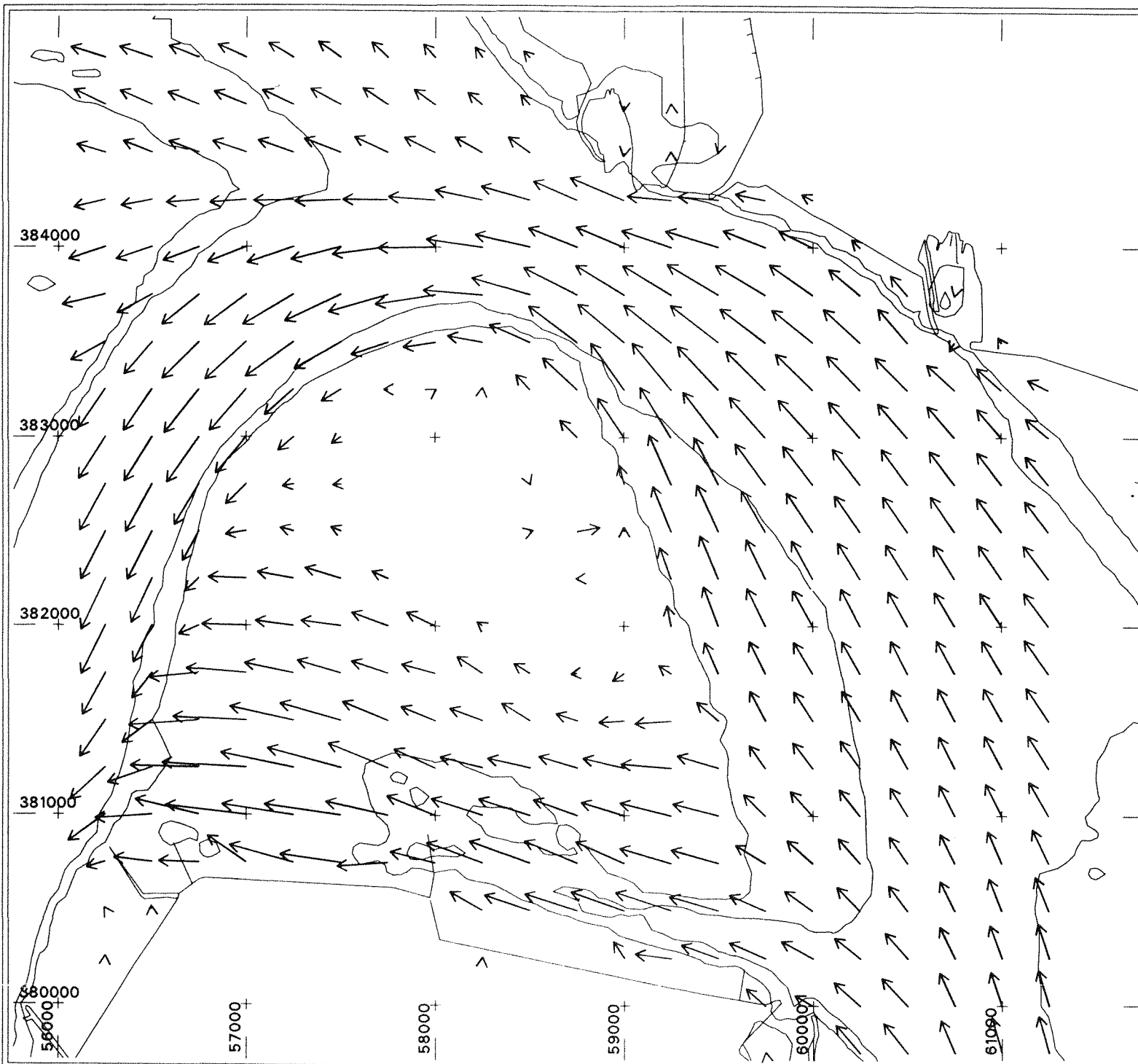
Snelheden : vs2490g
Richtingen : rs2490g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sijstermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



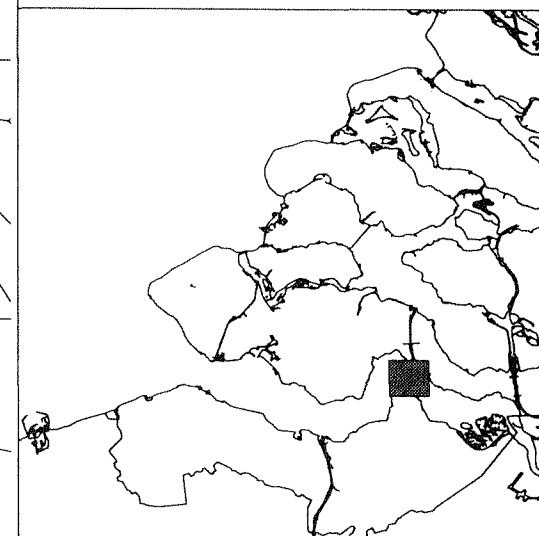


1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2520g

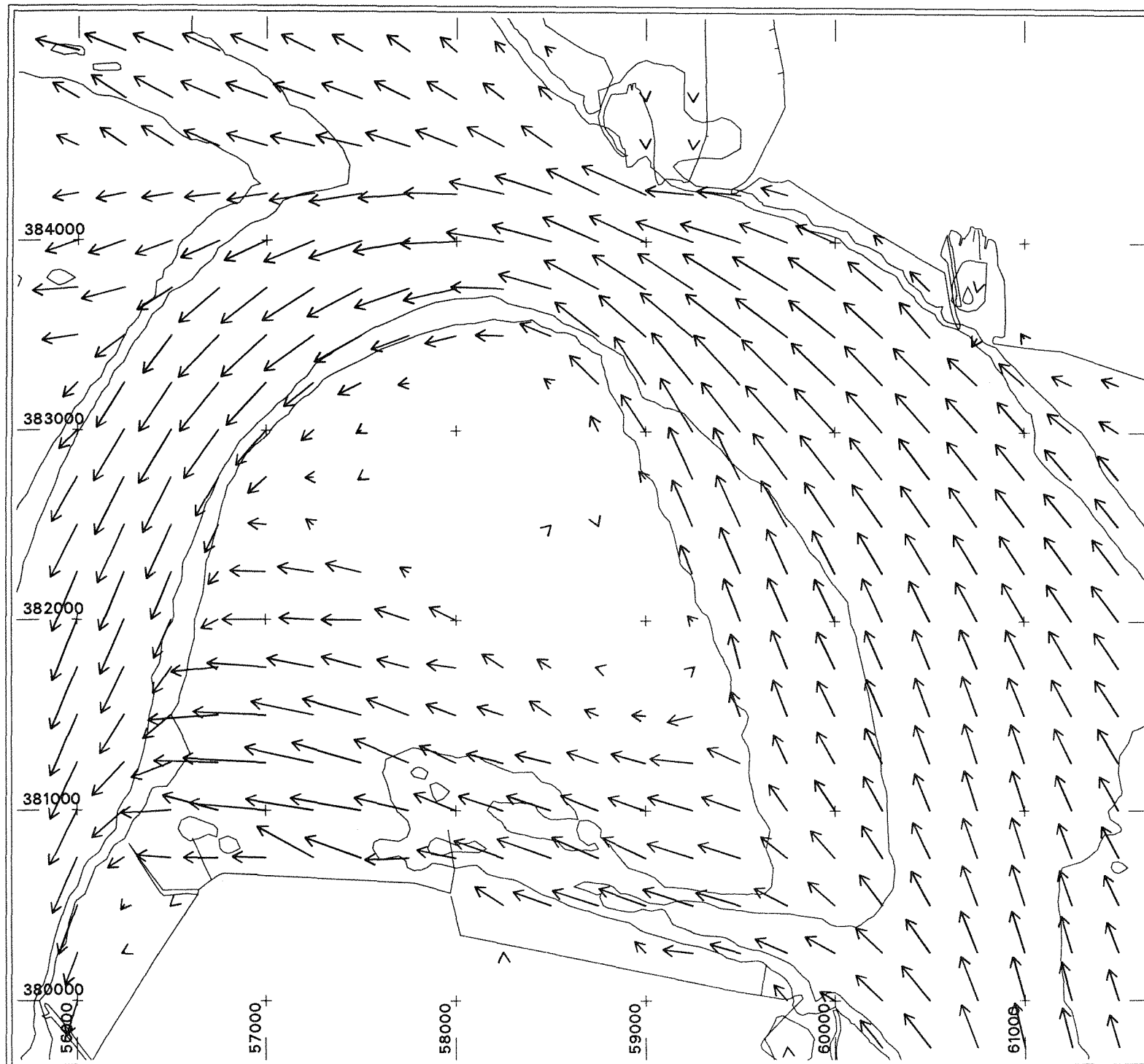
Richtingen : rs2520g



stroombeeld springtij
platen van Ossenissee

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



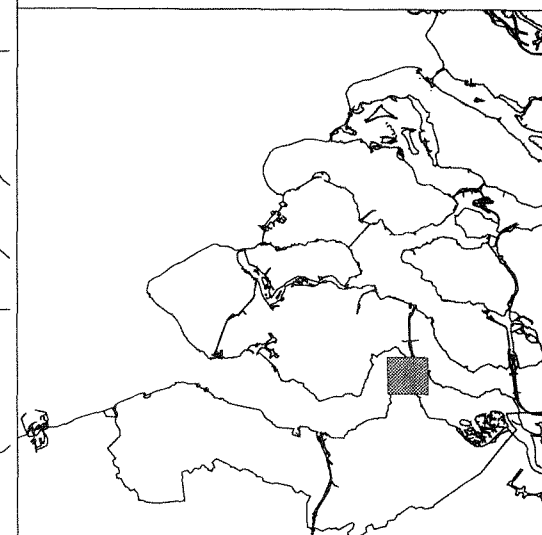


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2550g

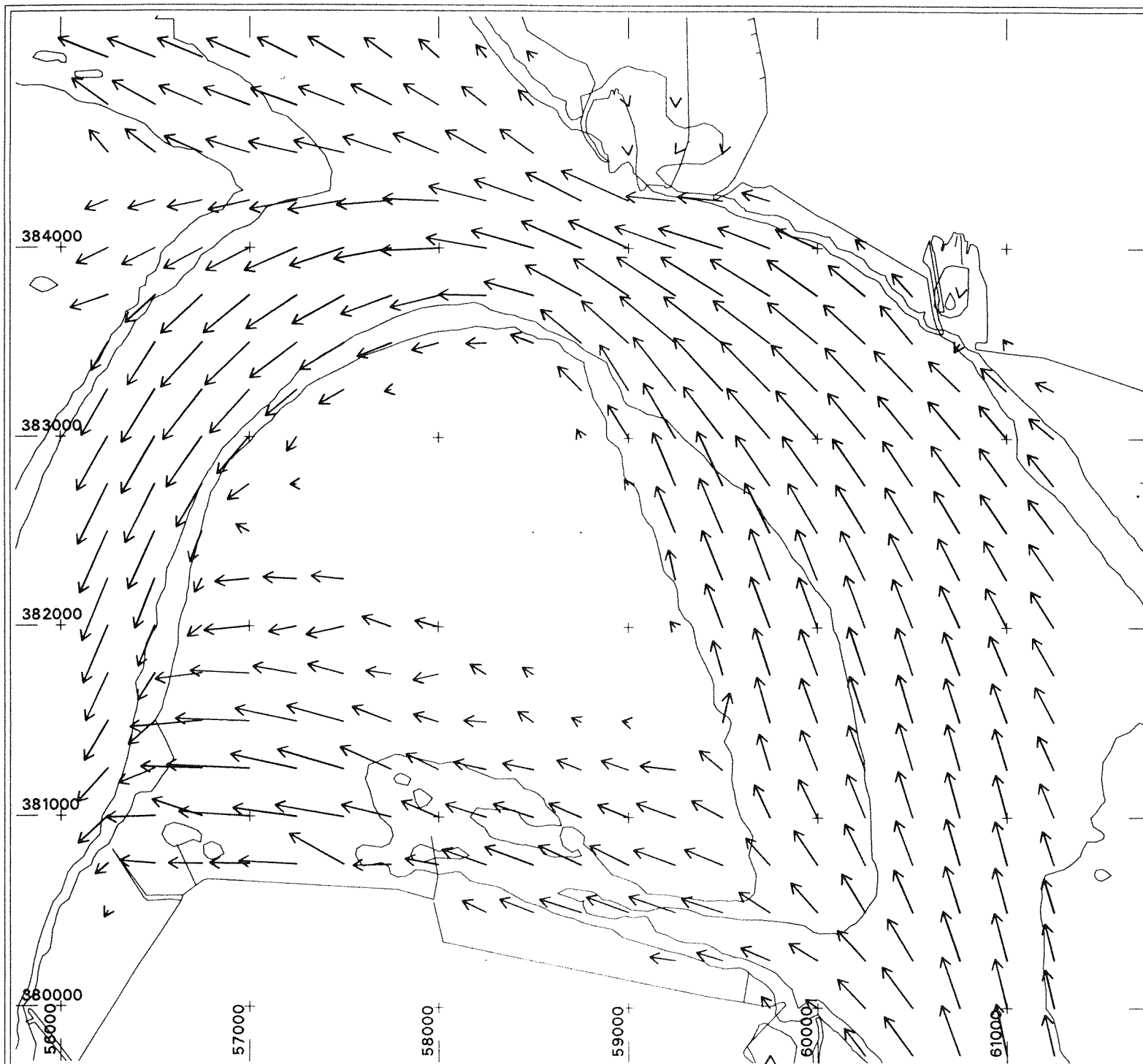
Richtingen : rs2550g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



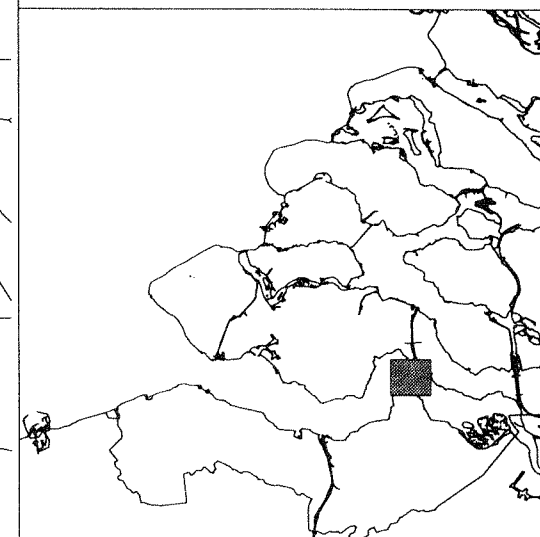


1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2580g

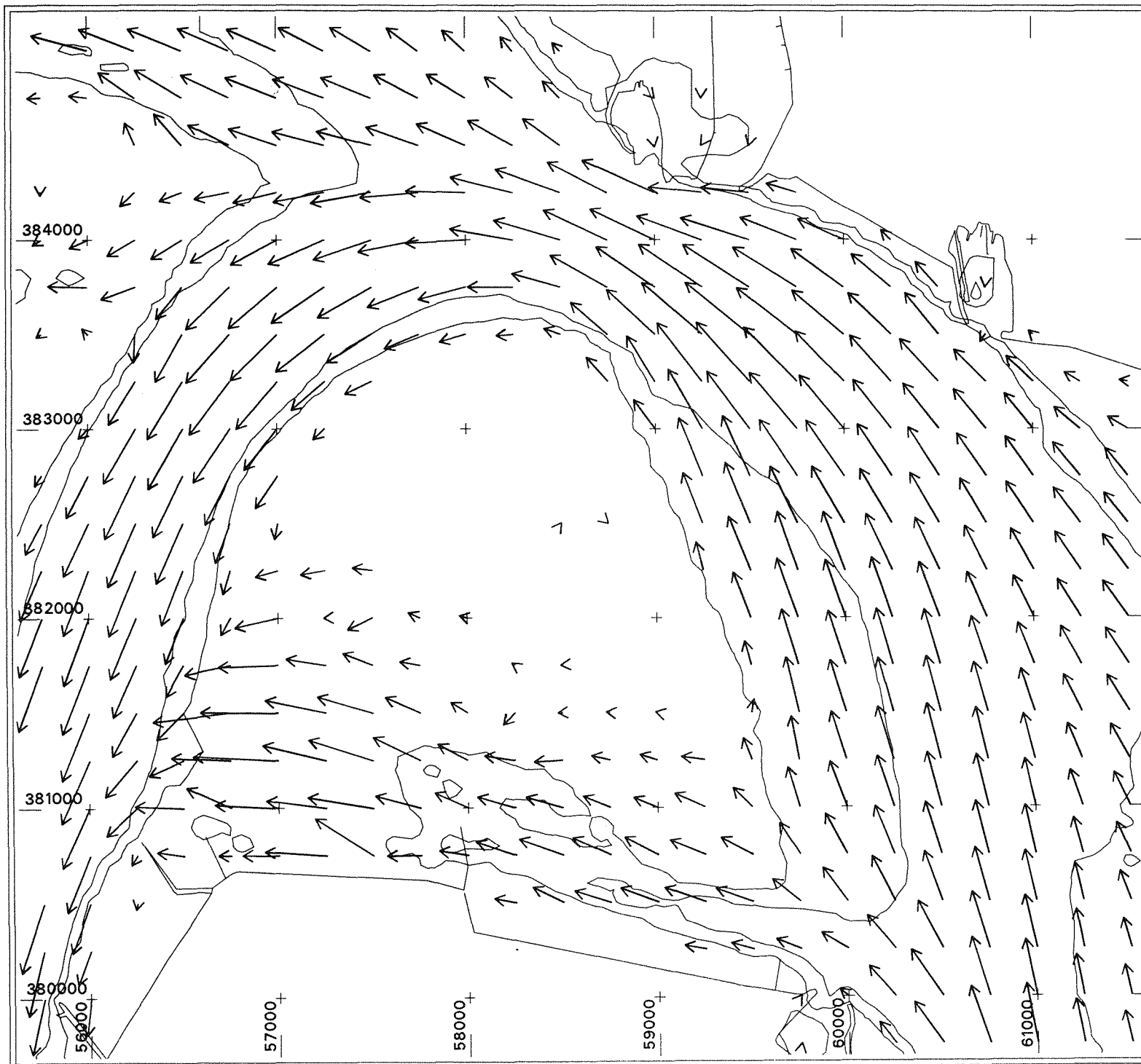
Richtingen : rs2580g



stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



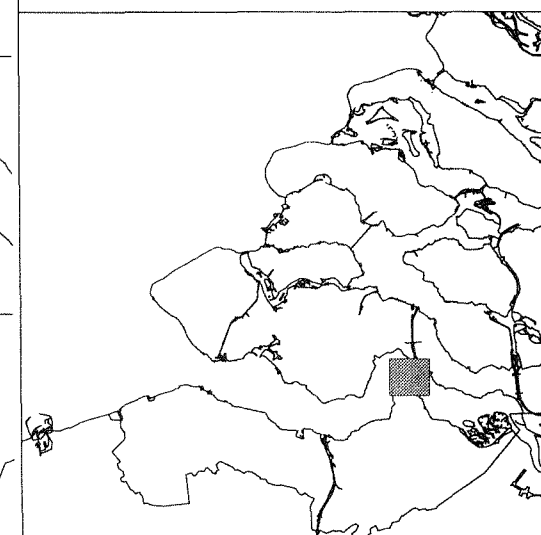


1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2610g

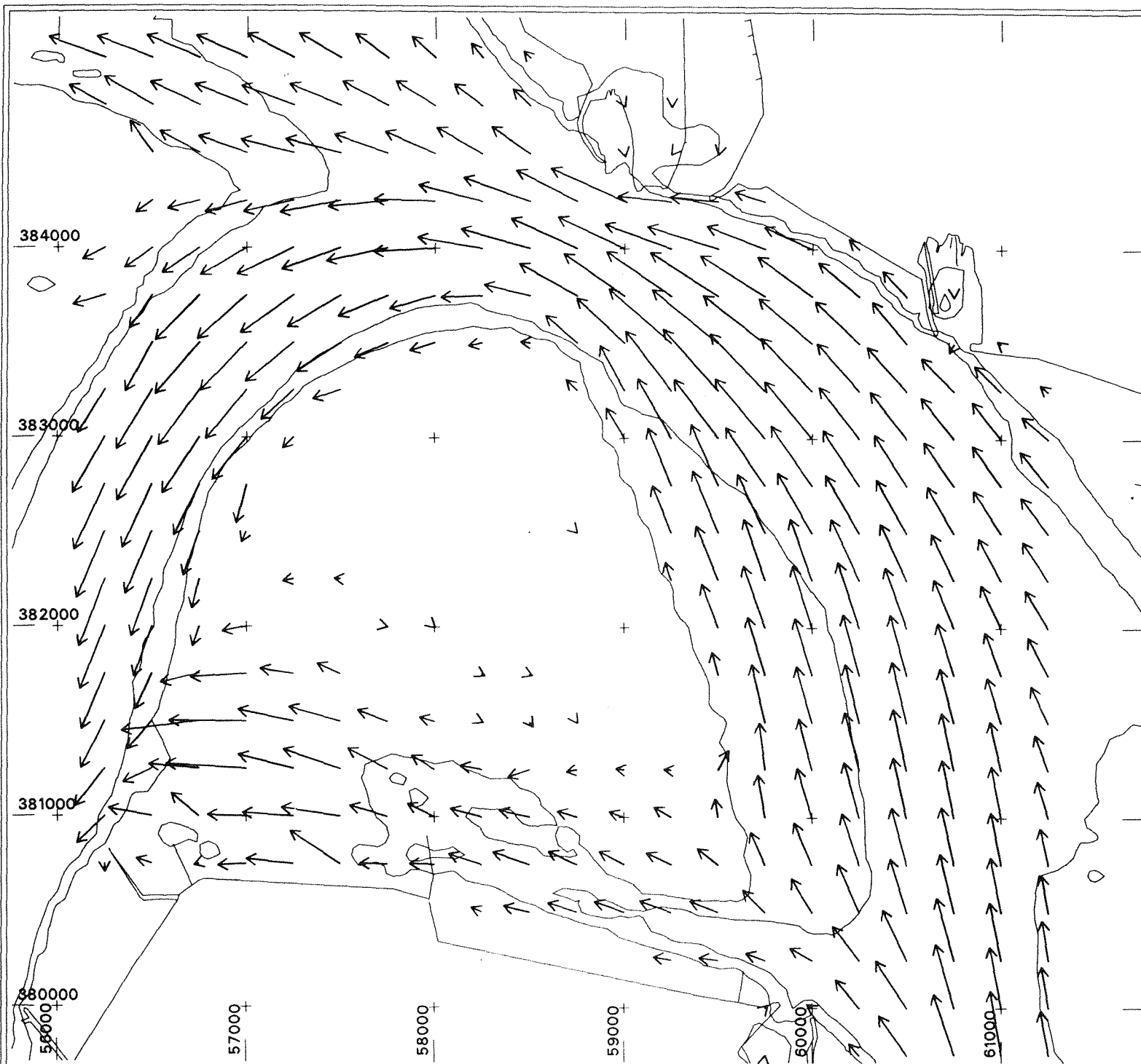
Richtingen : rs2610g



stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



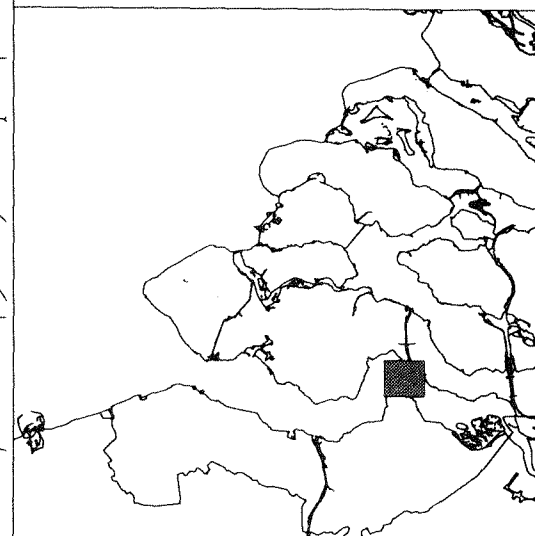


1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2640g

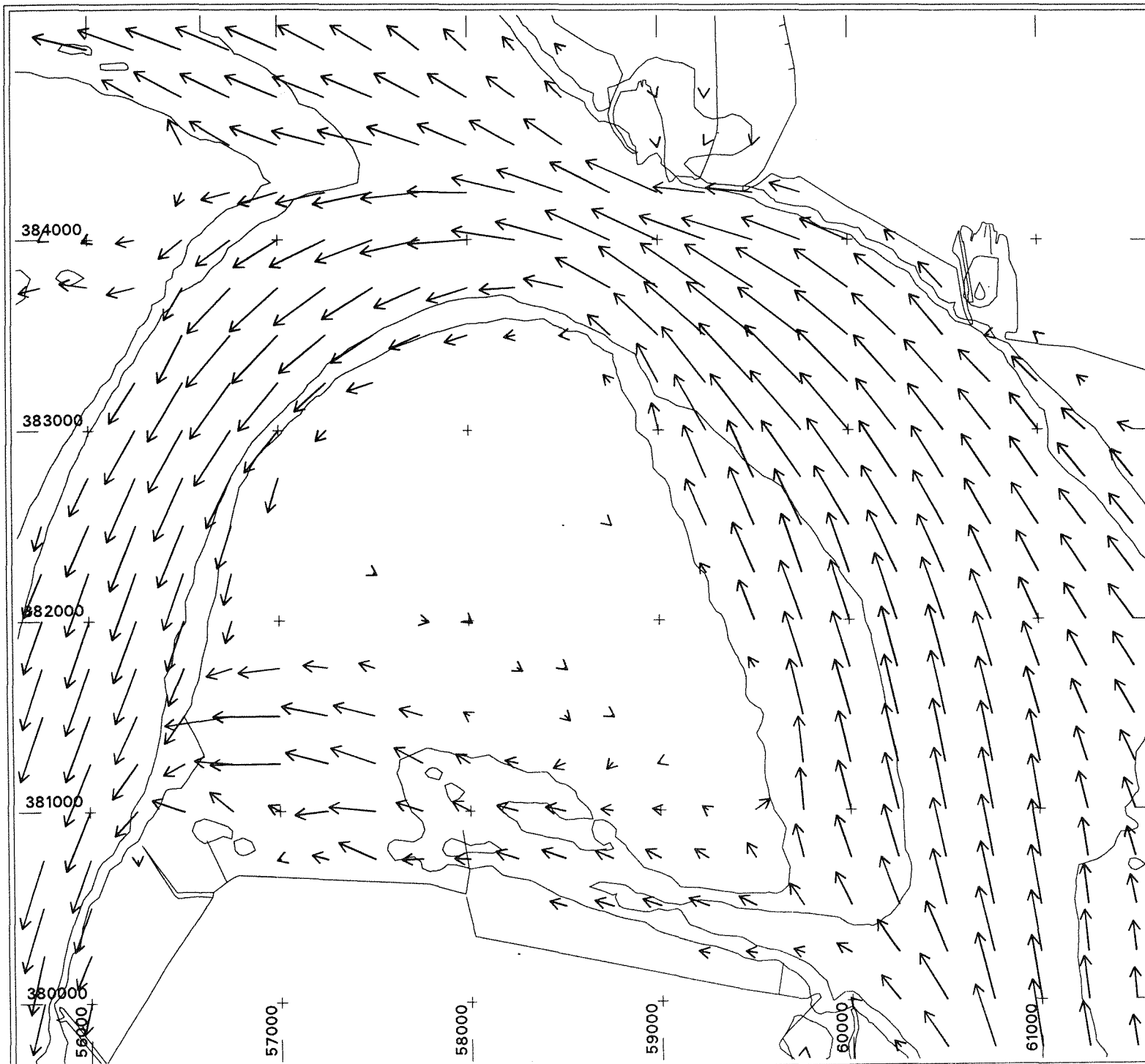
Richtingen : rs2640g



stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL

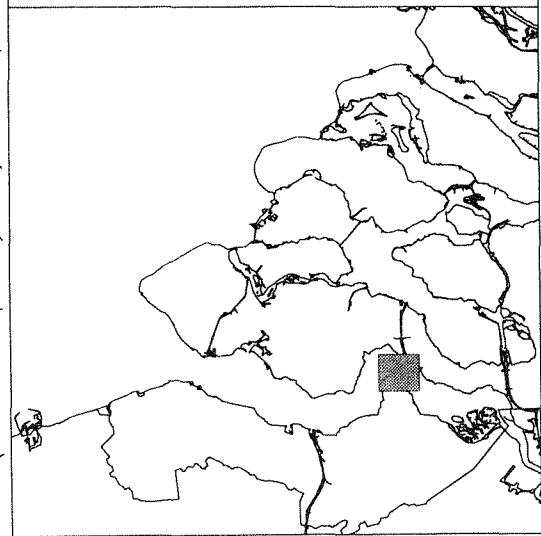




→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

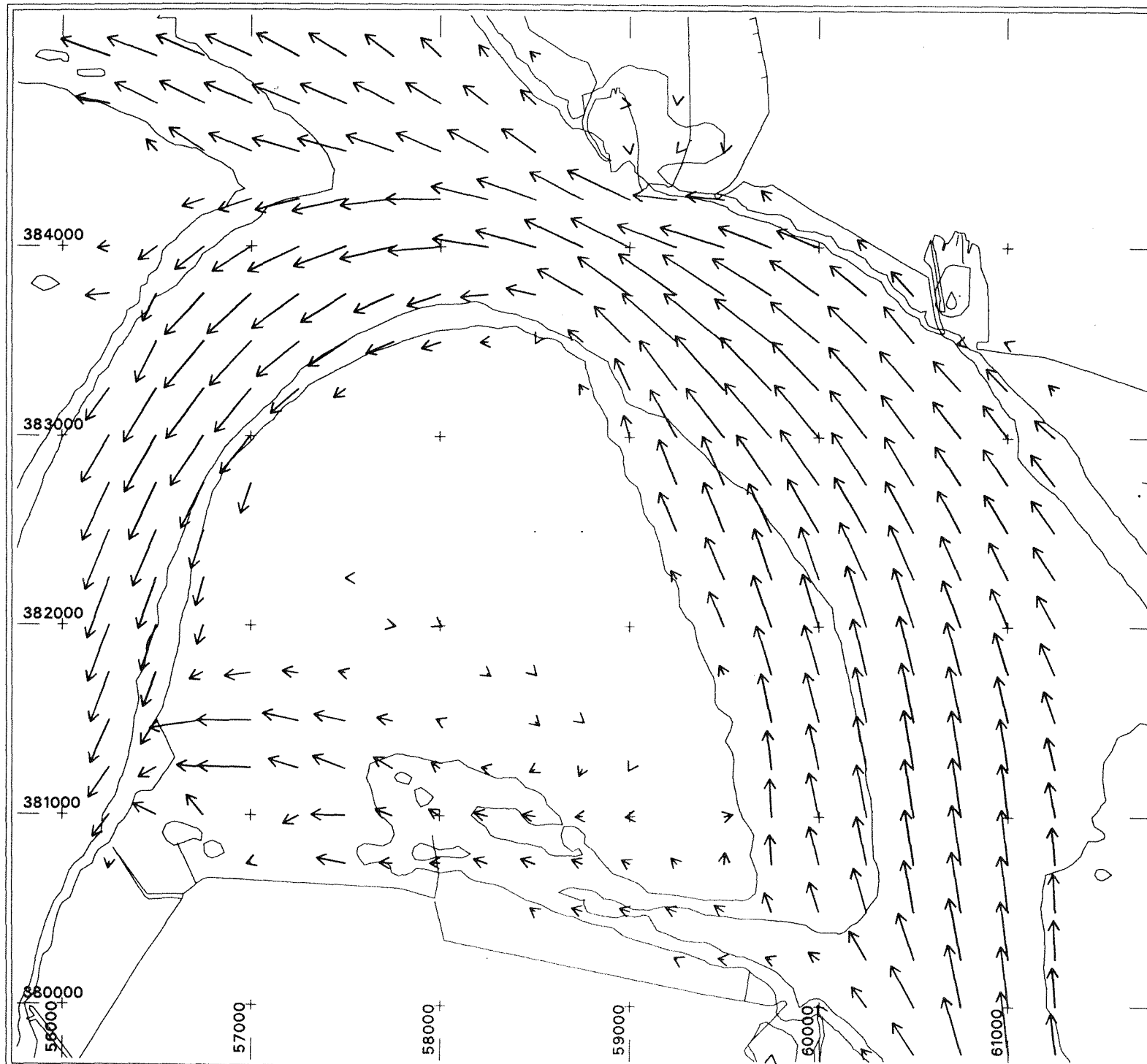
Snelheden : vs2670g
Richtingen : rs2670g



stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



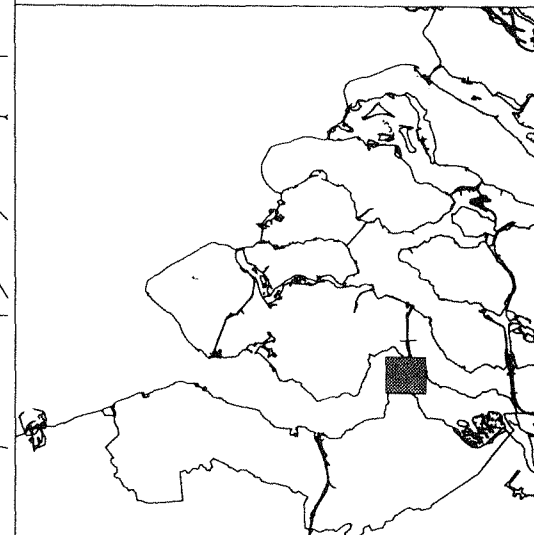


1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2700g

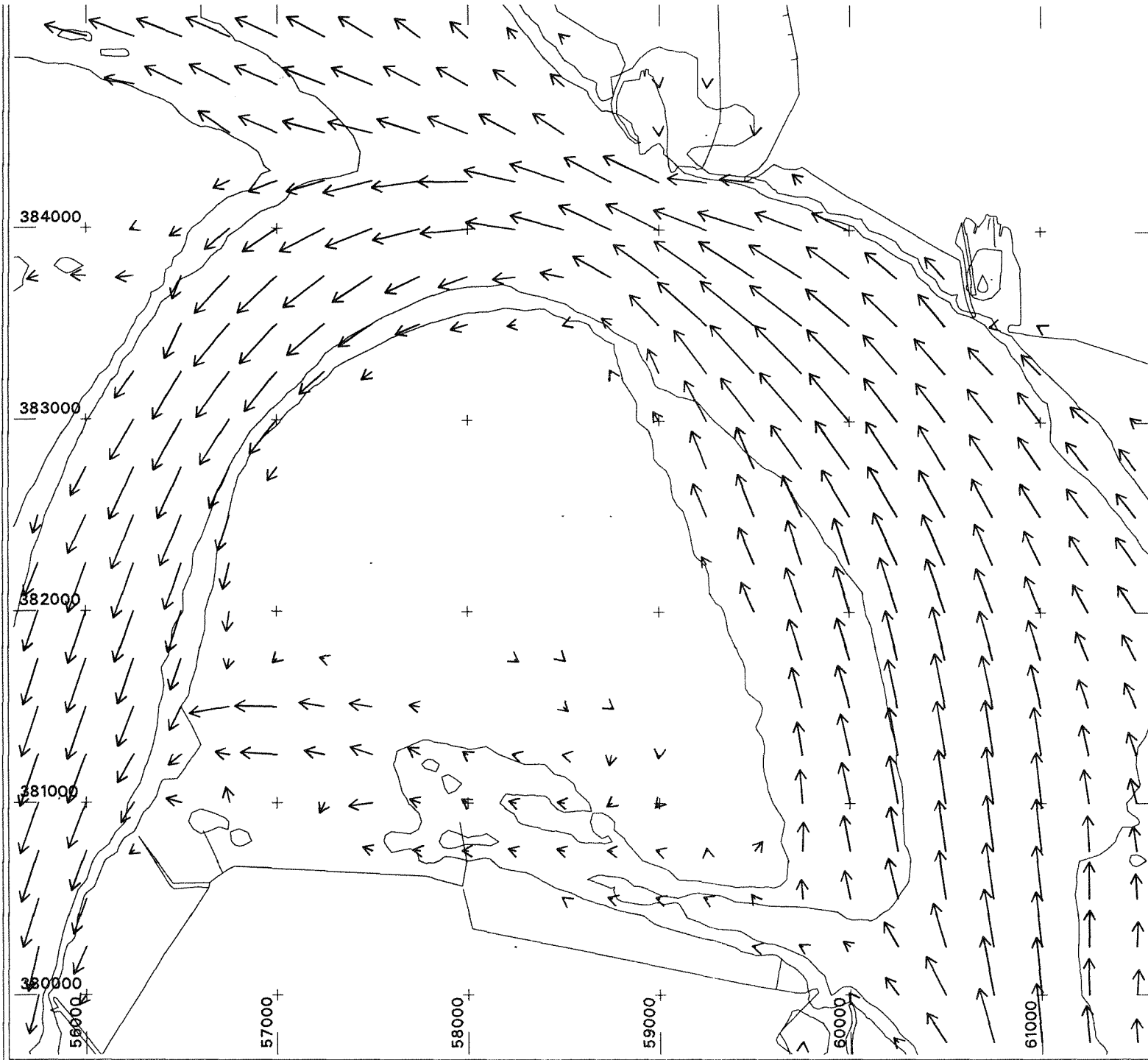
Richtingen : rs2700g



stroombeeld springtij
platen van Ossensisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



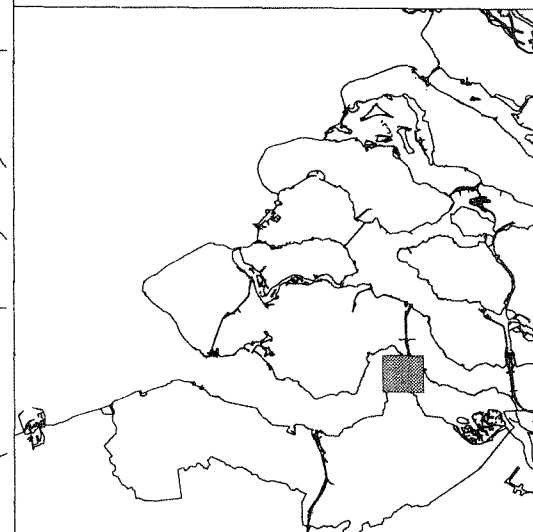


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2730g

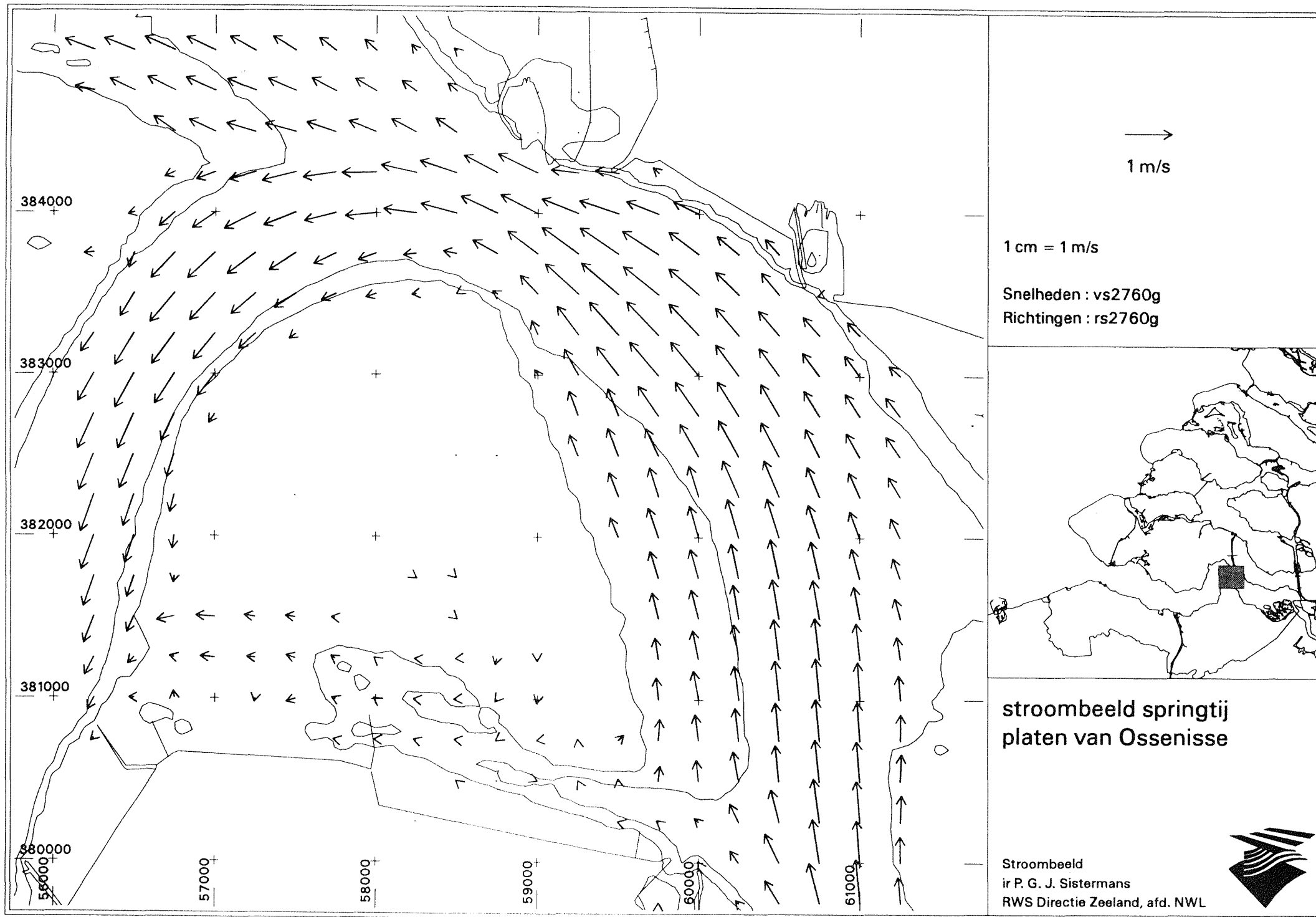
Richtingen : rs2730g

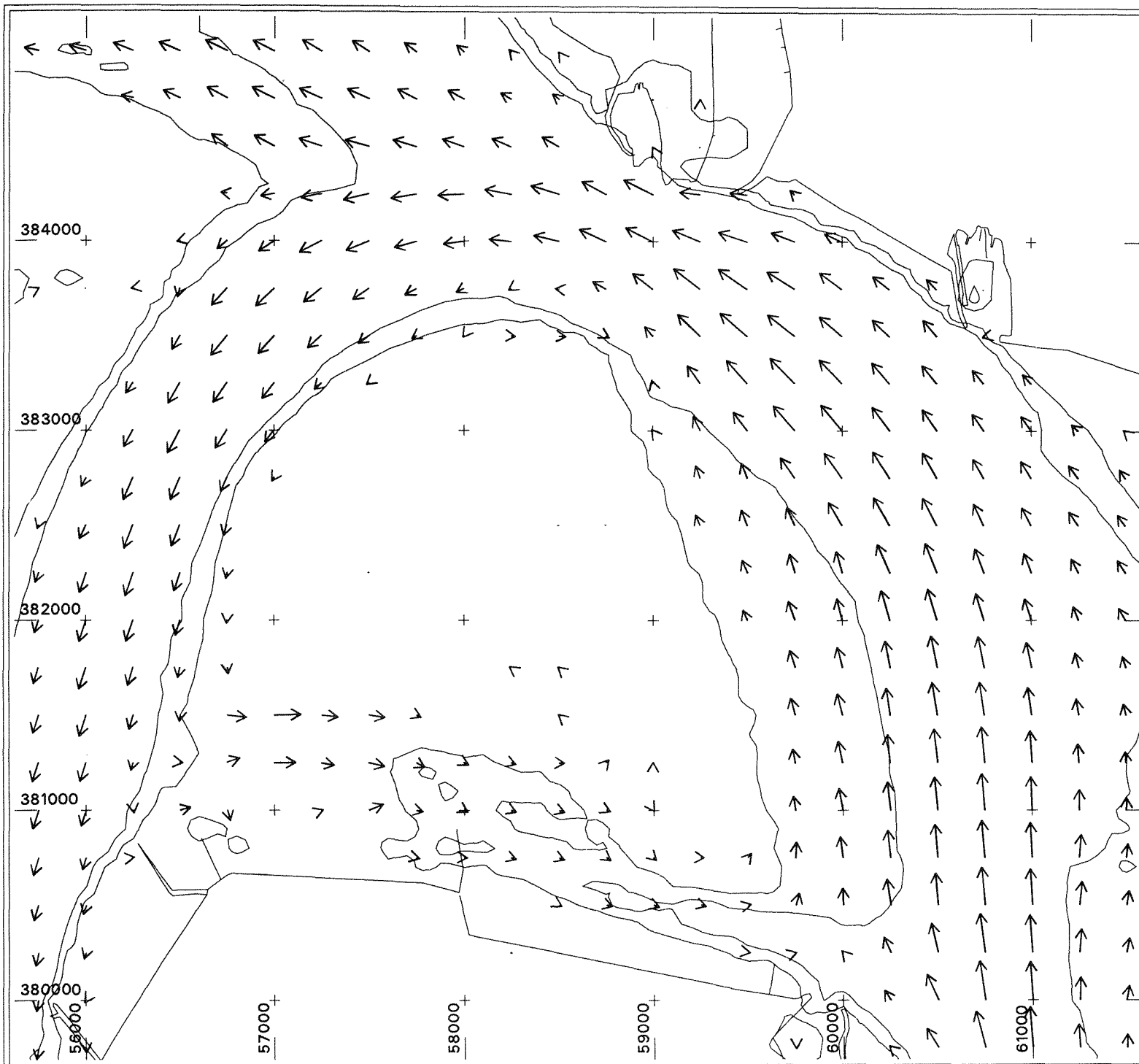


stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL





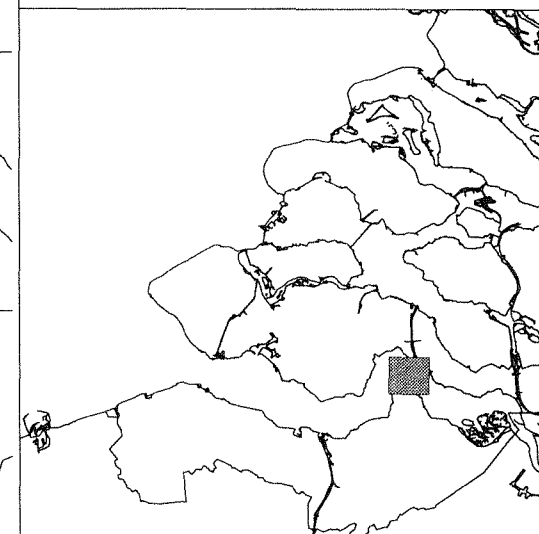


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2790g

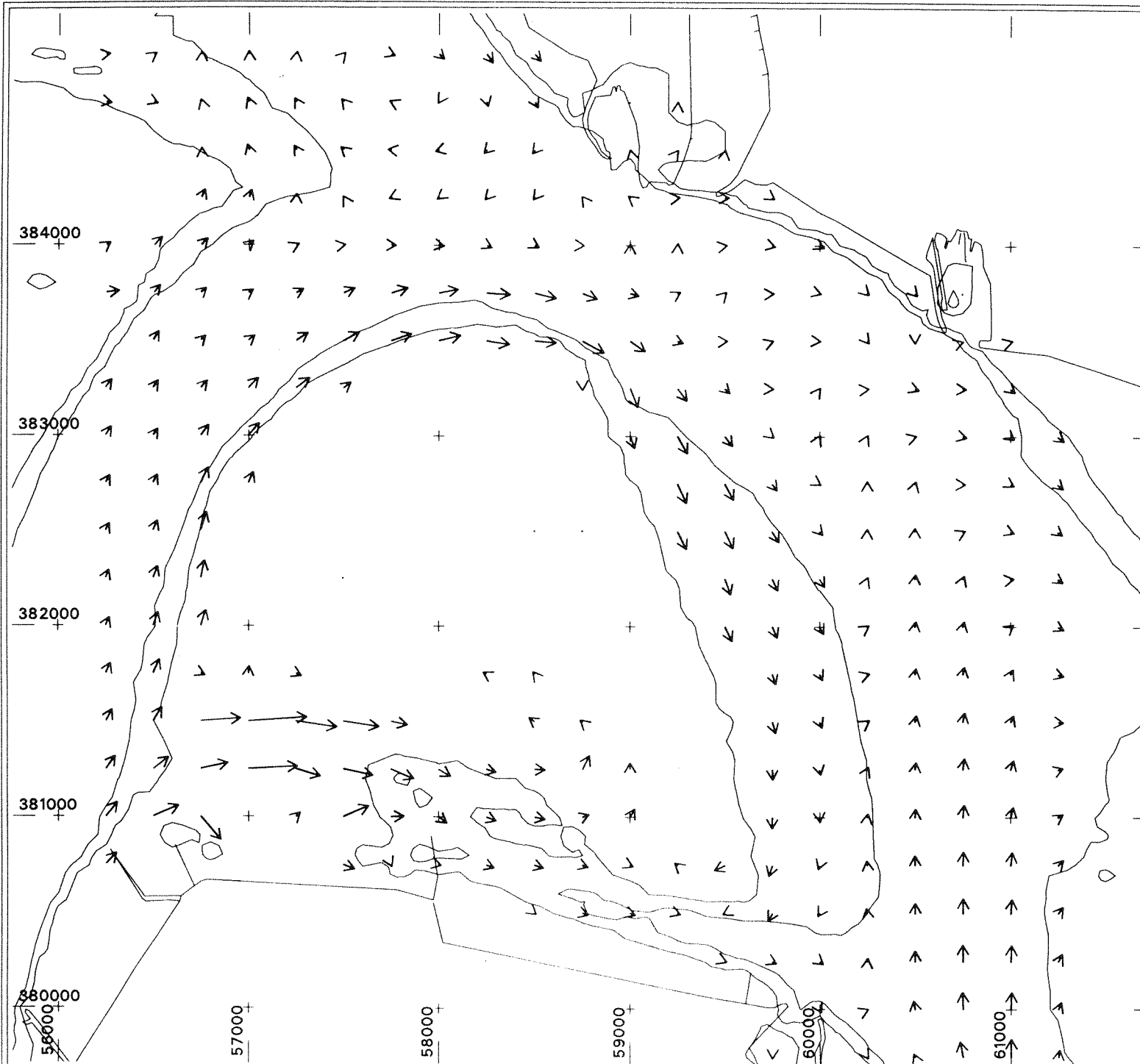
Richtingen : rs2790g



stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL

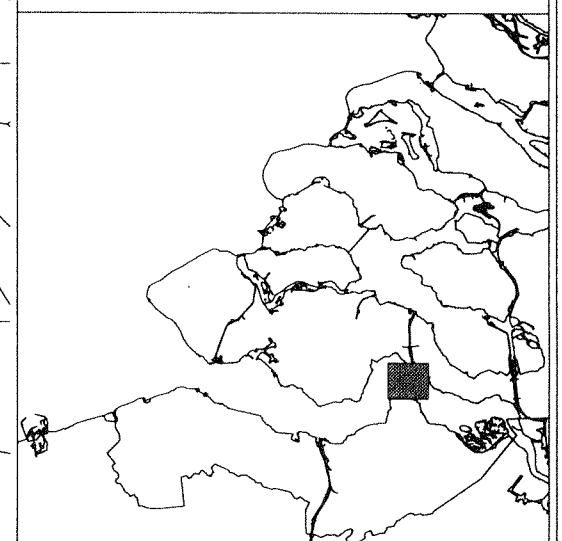




→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

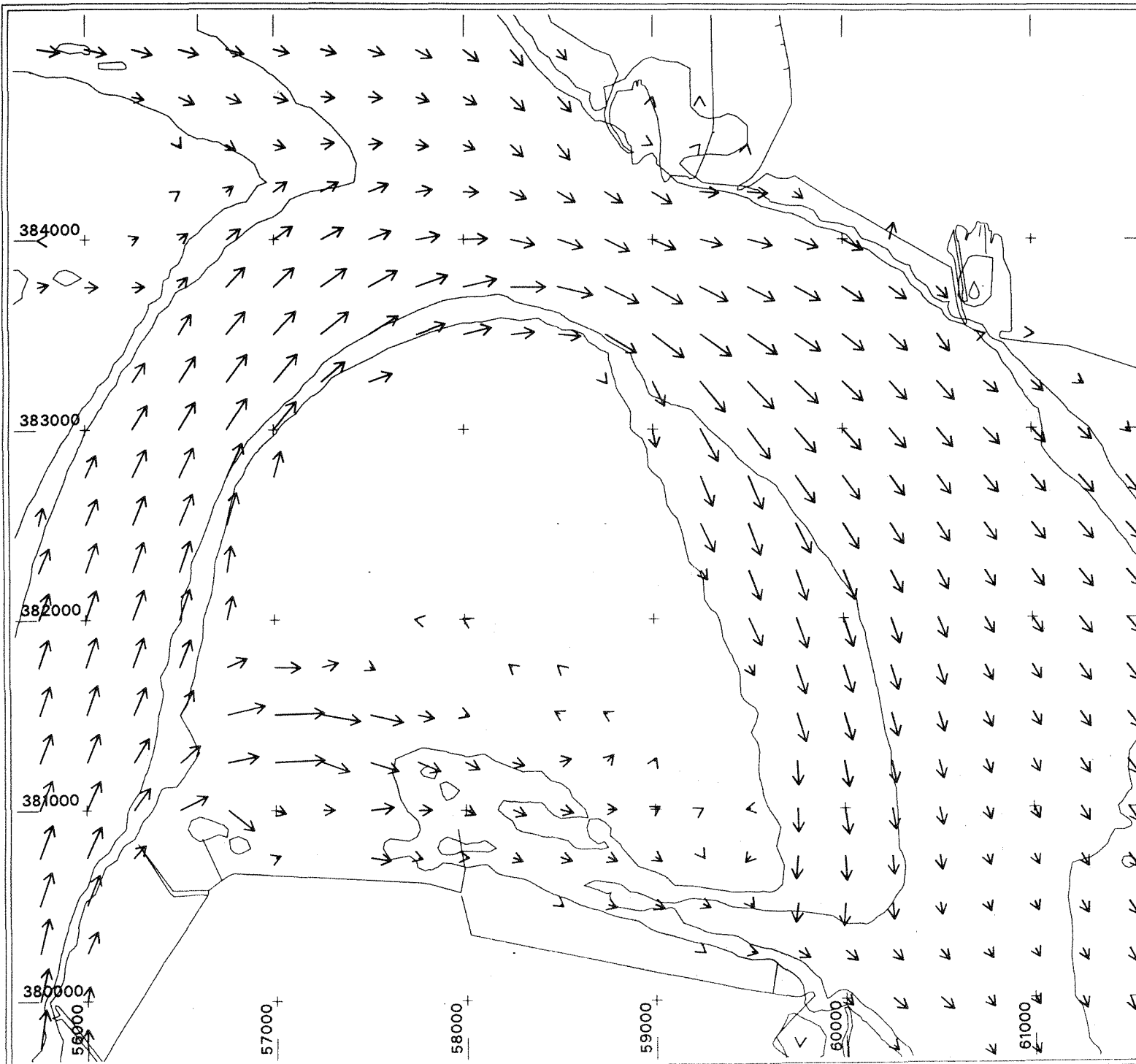
Snelheden : vs2820g
Richtingen : rs2820g



stroombeeld springtij
platen van Ossenis

Stroombeeld
ir P. G. J. Sijstermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



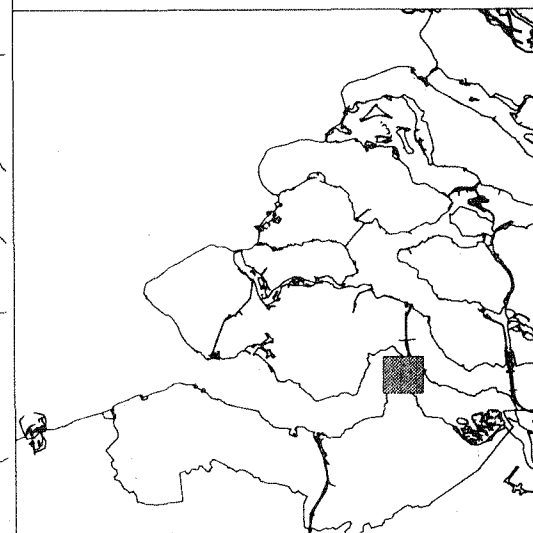


→
1 m/s

1 cm = 1 m/s

Snelheden : vs2850g

Richtingen : rs2850g

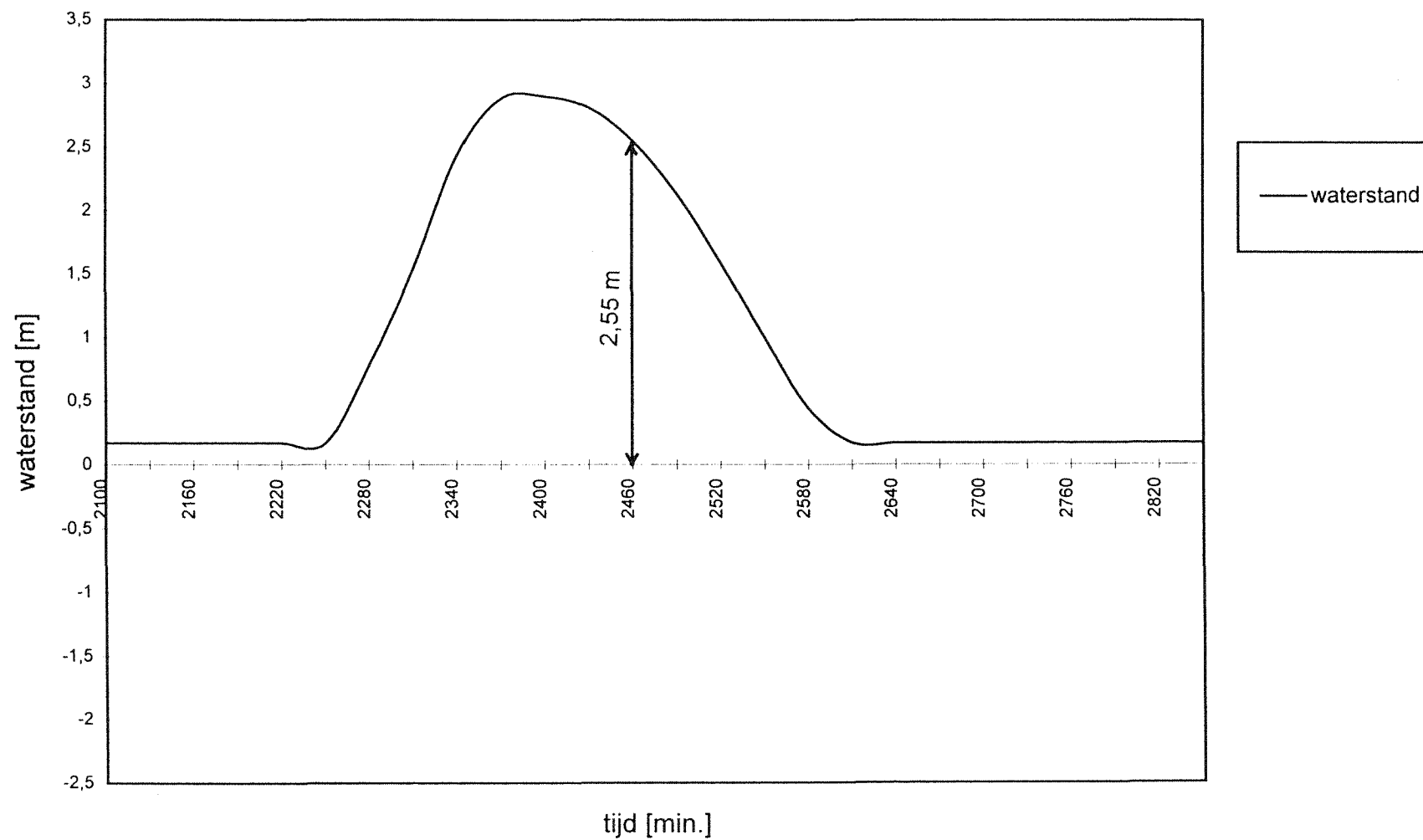


stroombeeld springtij
platen van Ossenisse

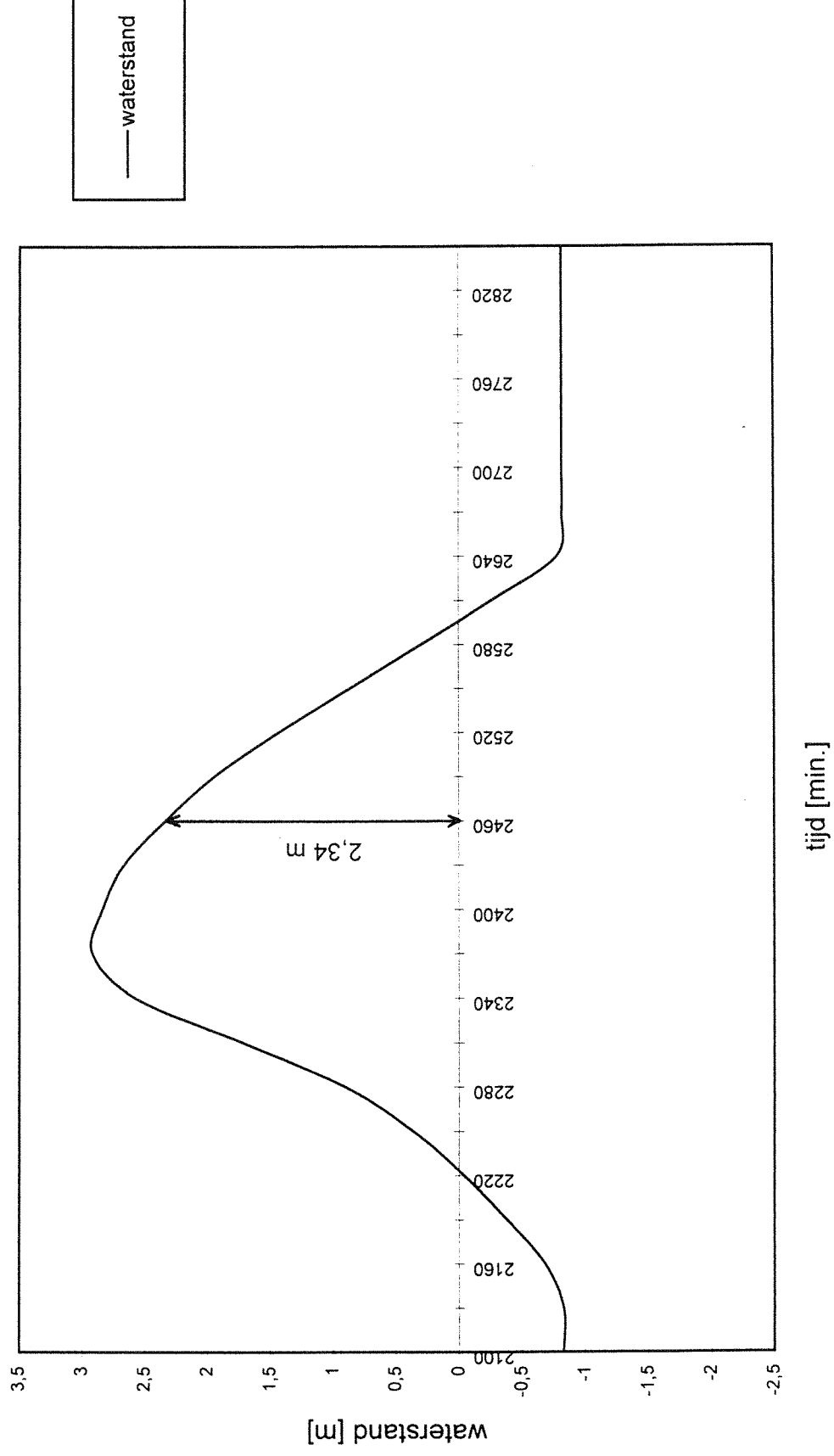
Stroombeeld
ir P. G. J. Sistermans
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



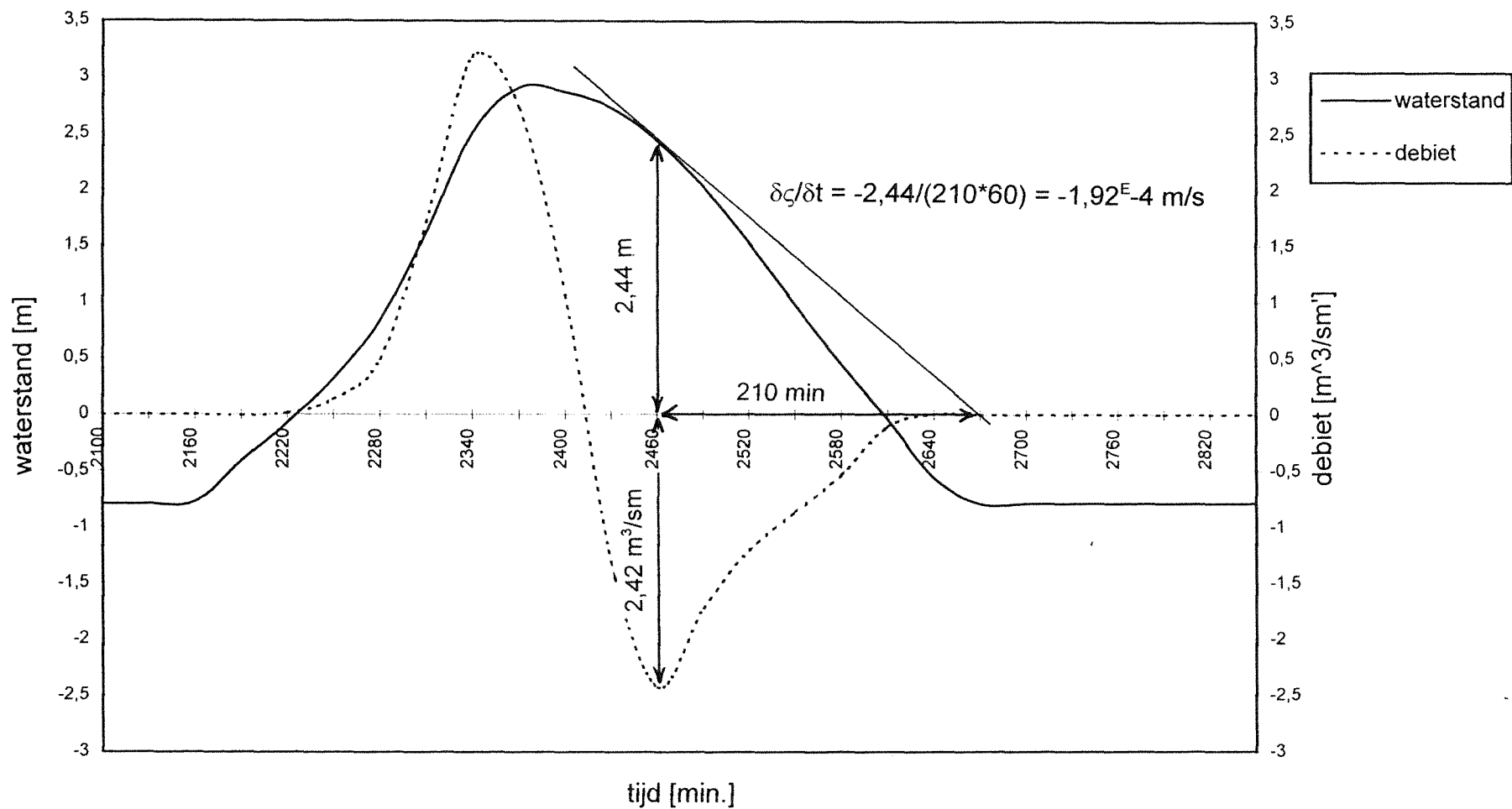
PLAAT VAN OSSENISSE waterstand punt 1 (X=59250 Y = 382000)



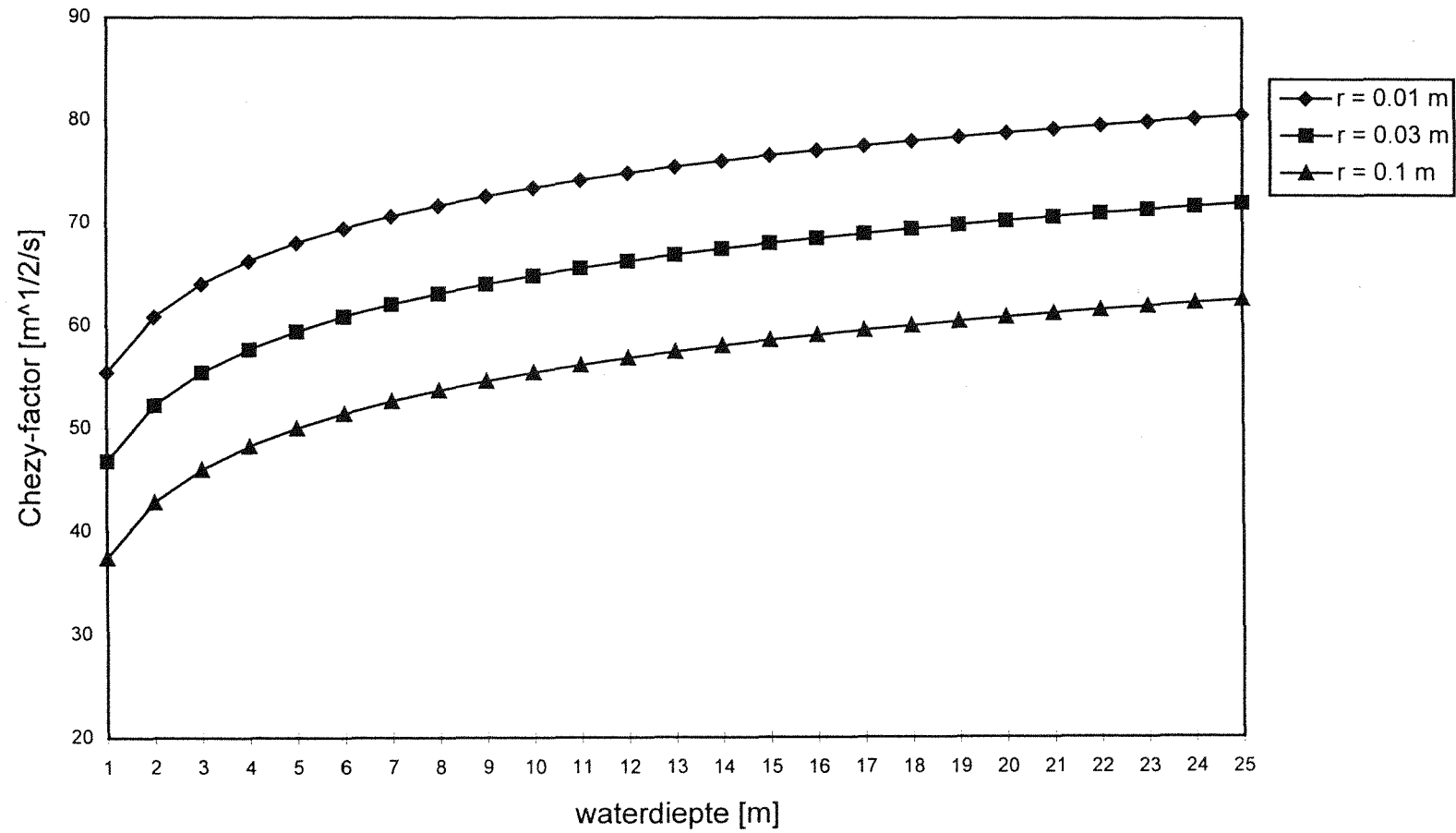
PLAAT VAN OSSENISSE waterstand punt 2 (X=57000 Y = 382000)



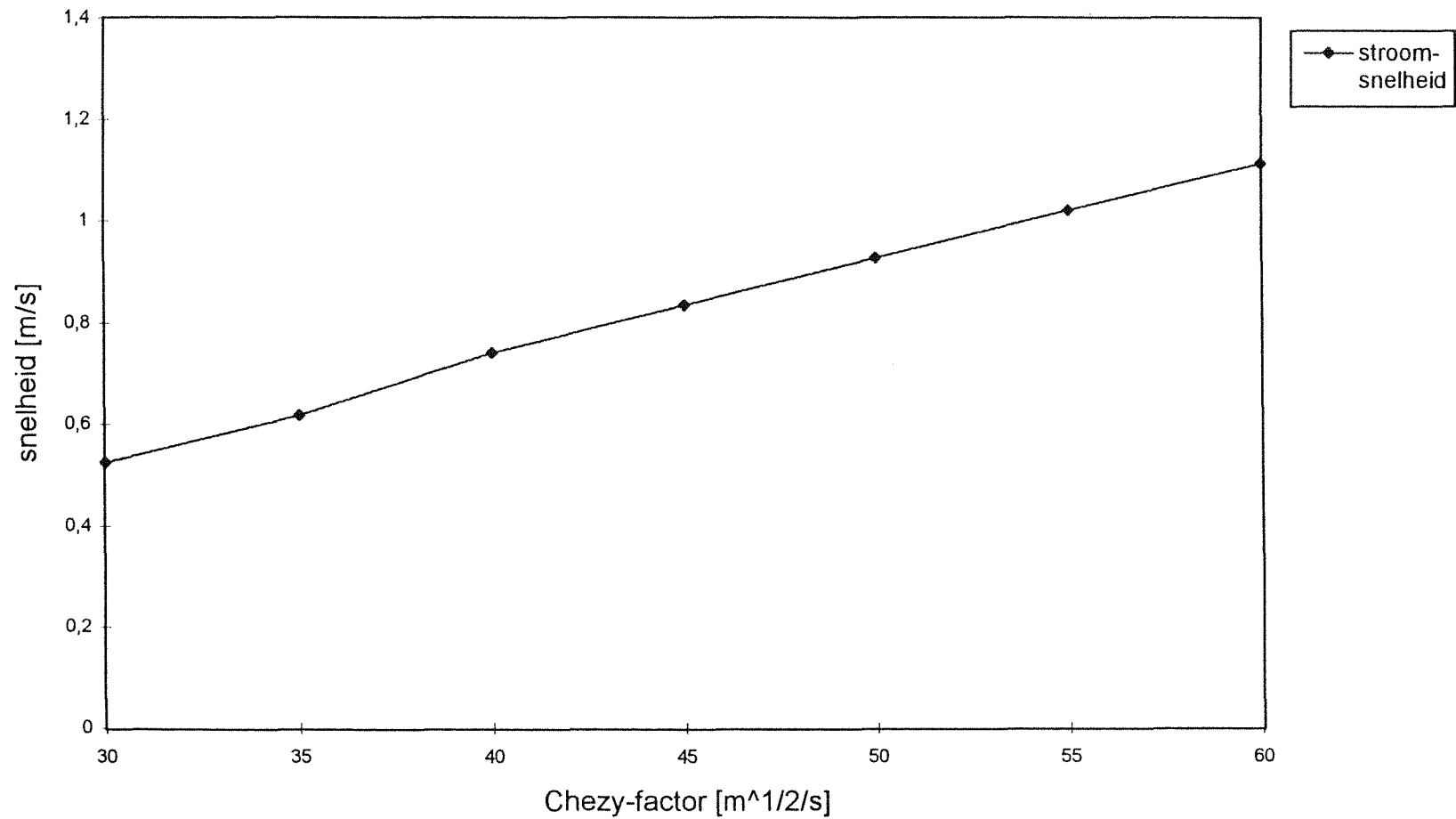
PLAAT VAN OSSENISSE waterstand en debiet punt A (X=58000 Y = 382000)
NAP -0.8m



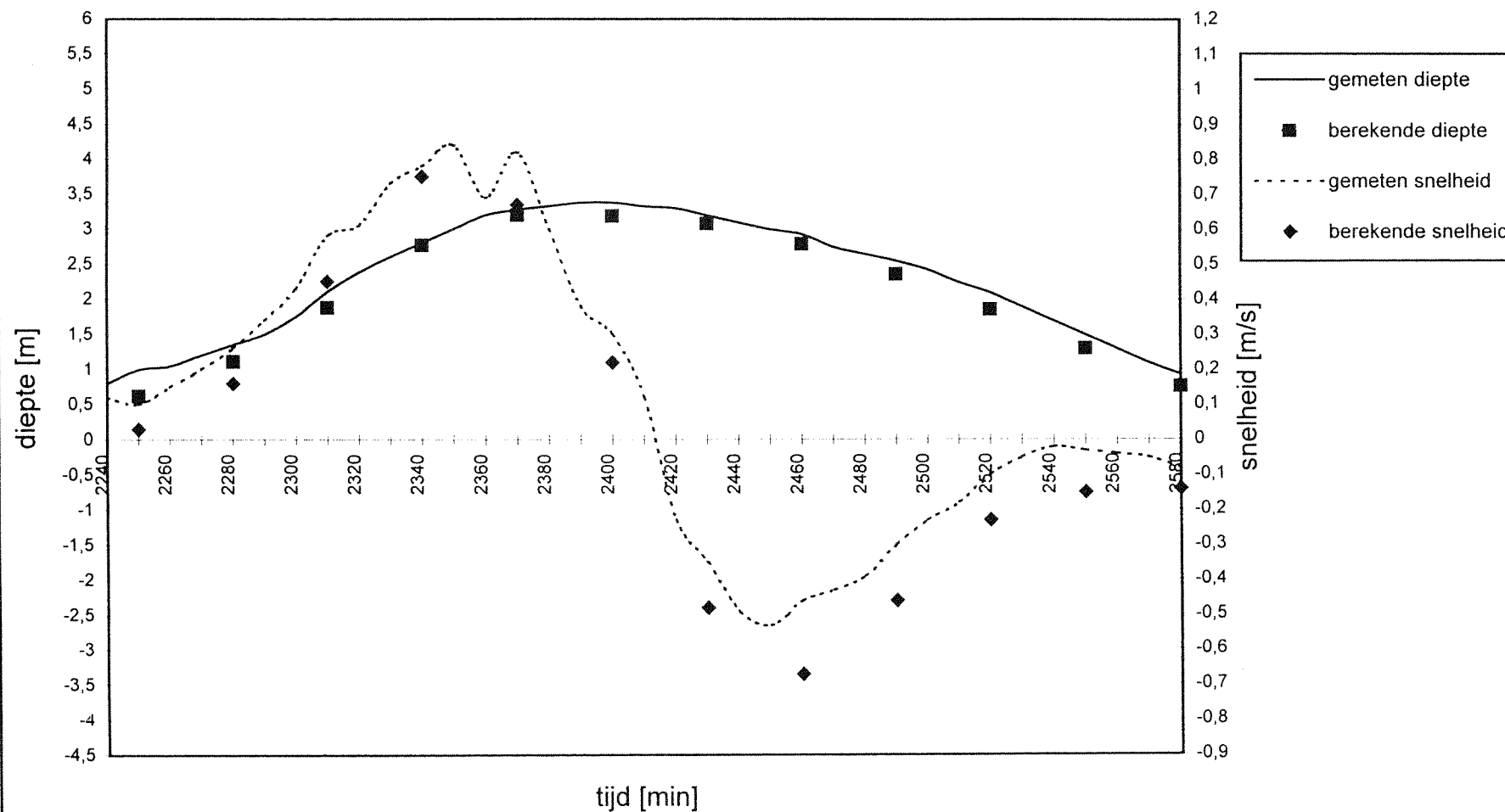
Invloed bodemruwheid en waterdiepte op Chezy-factor



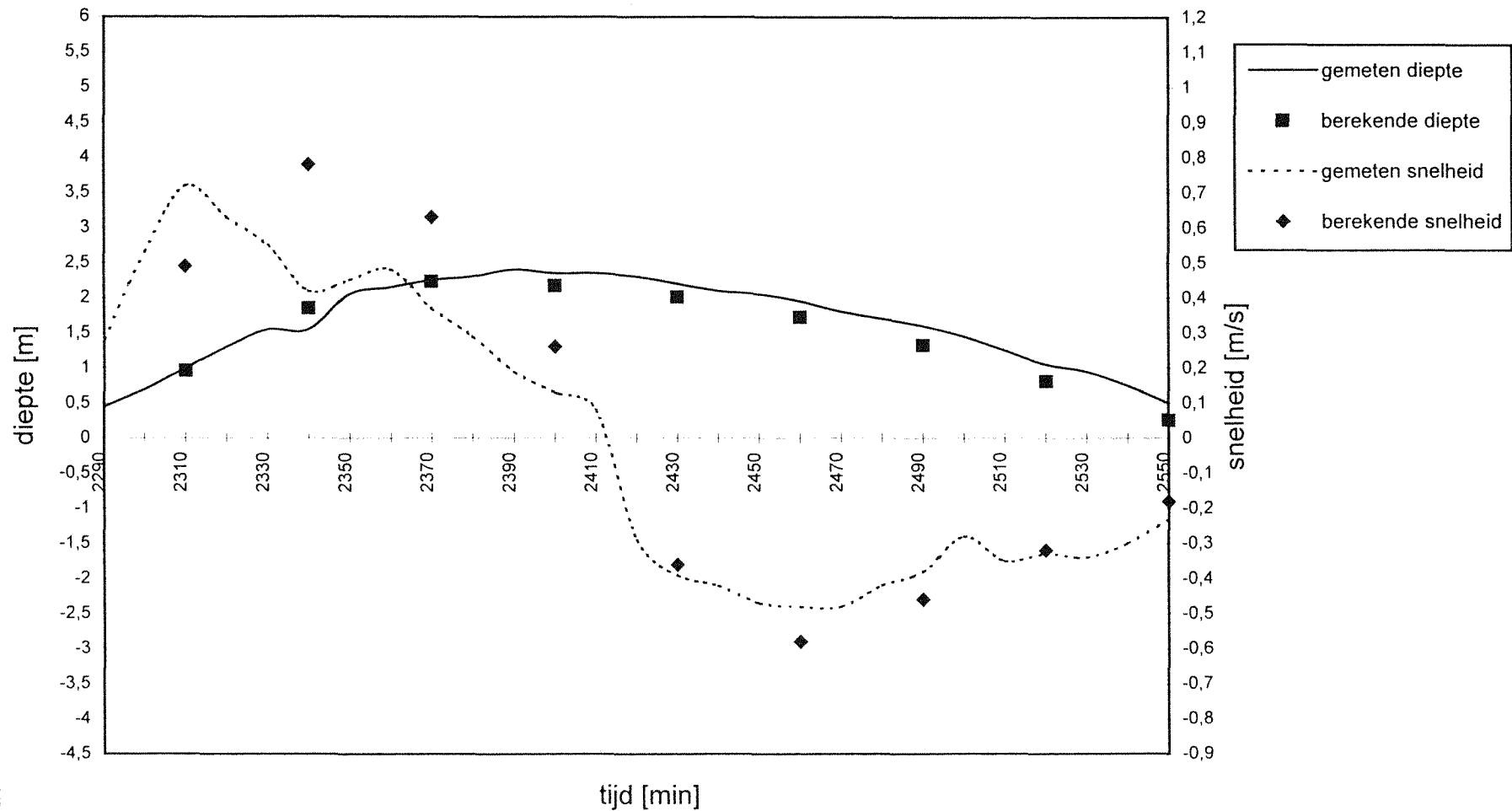
Invloed Chezy-factor op stroomsnelheid



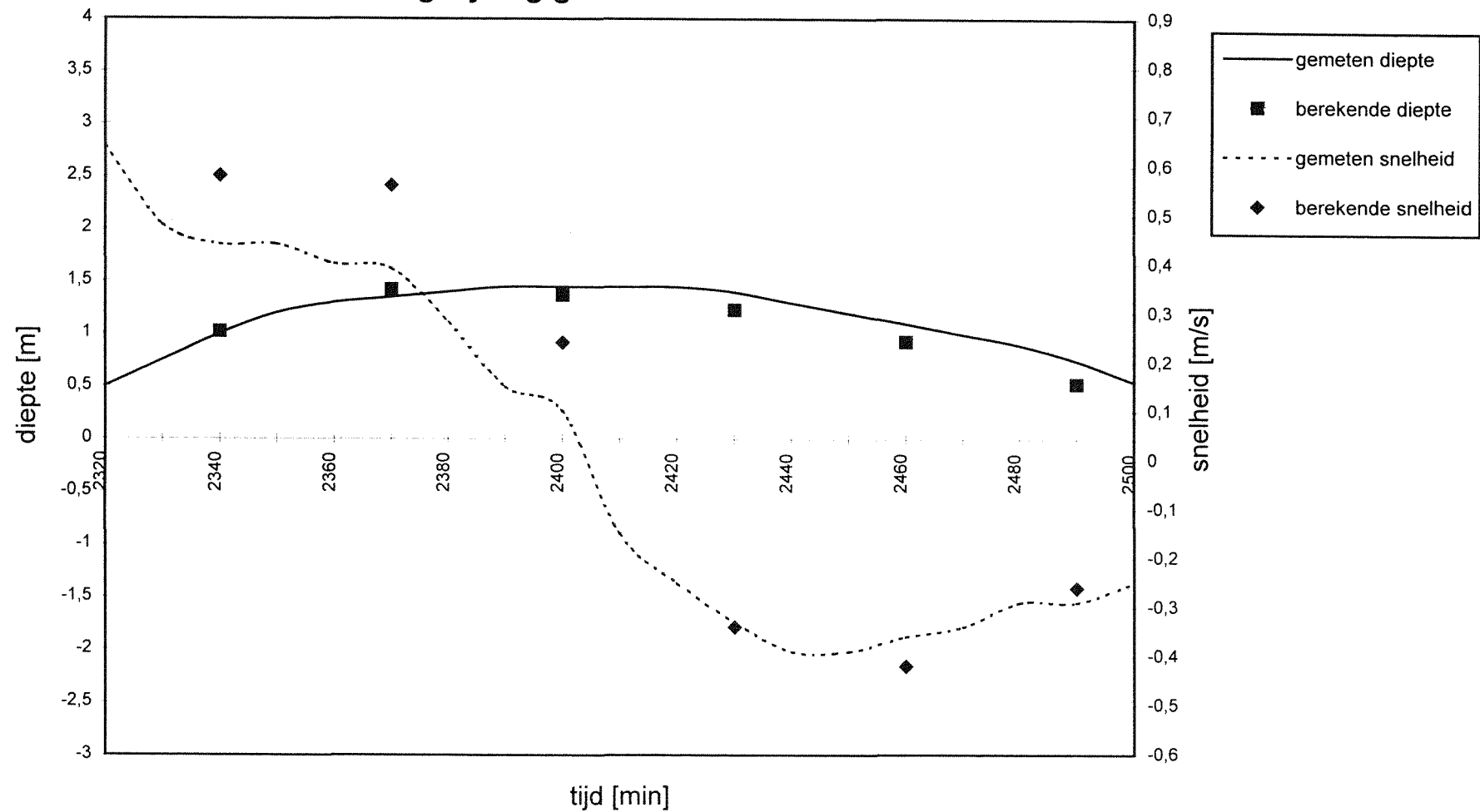
LANDSTELLING (58750, 381625) SPRINGTIJ vergelijking gemeten en berekende waarden

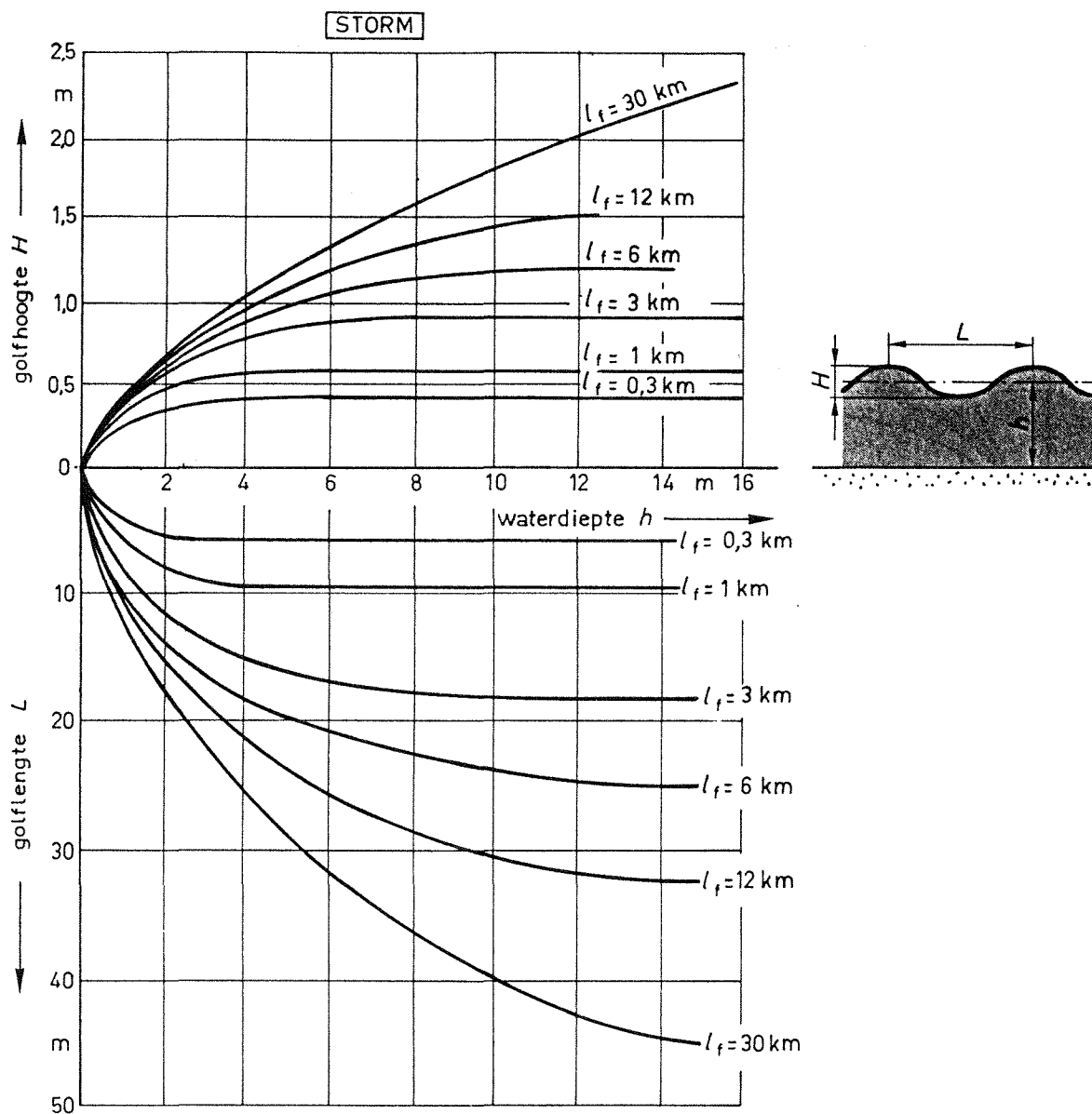


ZEESTELLING (57750, 382250) SPRINGTIJ **vergelijking gemeten en berekende waarden**



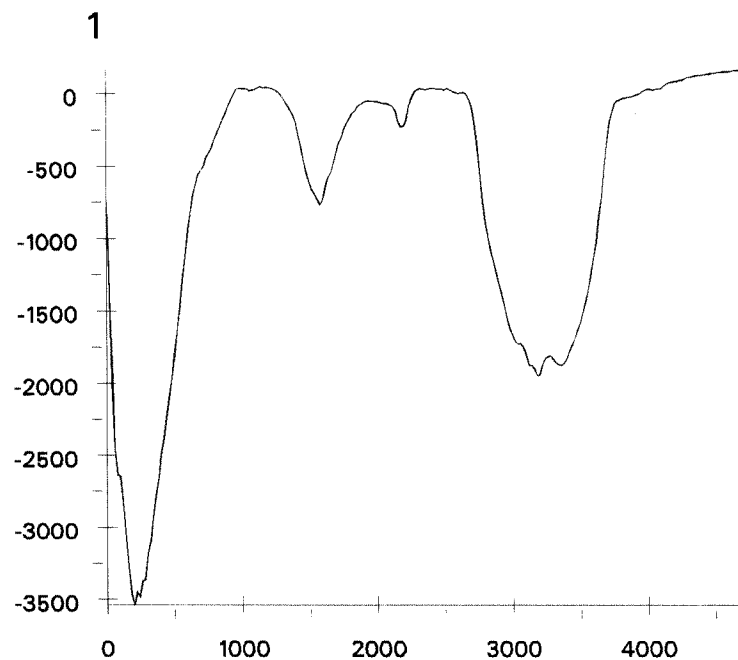
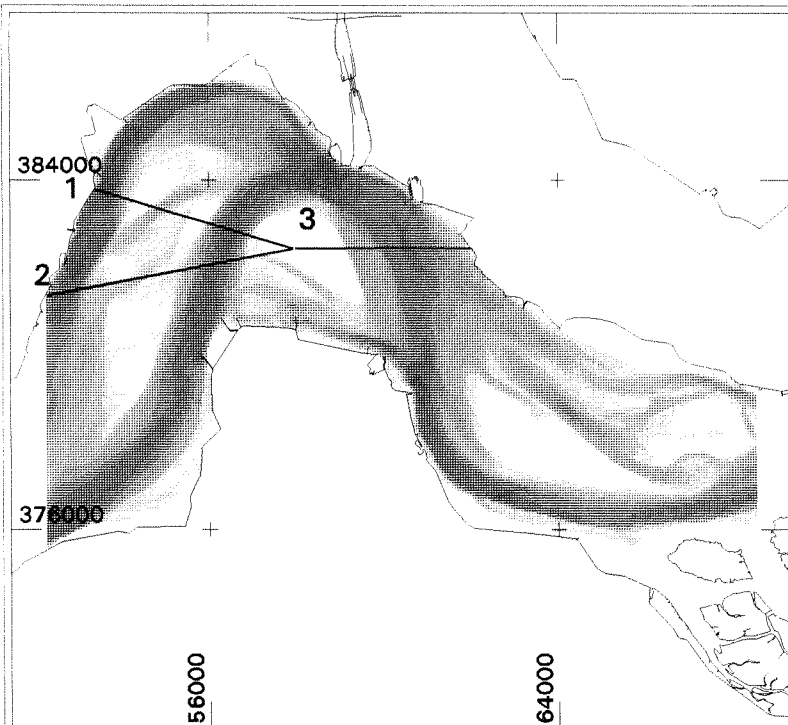
HOGE STELLING (58000, 382250) SPRINGTIJ vergelijking gemeten en berekende waarden



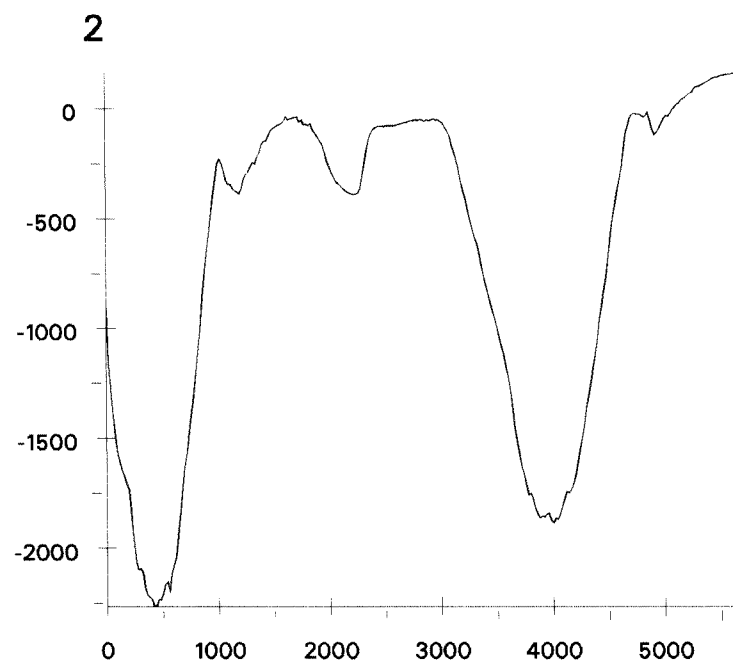
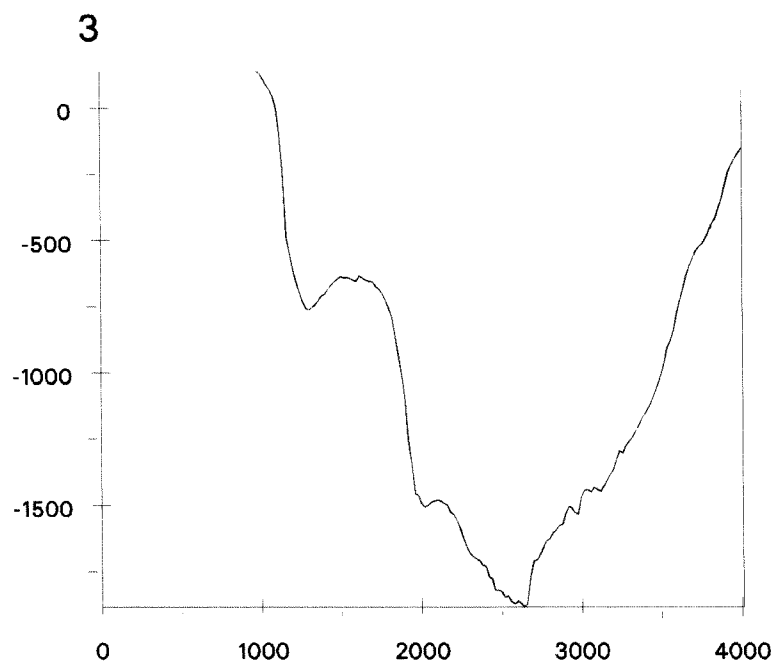


Maximale golfontwikkeling bij een gegeven strijklengte en waterdiepte tijdens storm (windkracht 9 of windsnelheid ongeveer 22 m/s)

UIT: GROEN & DORRESTEIN.



1988



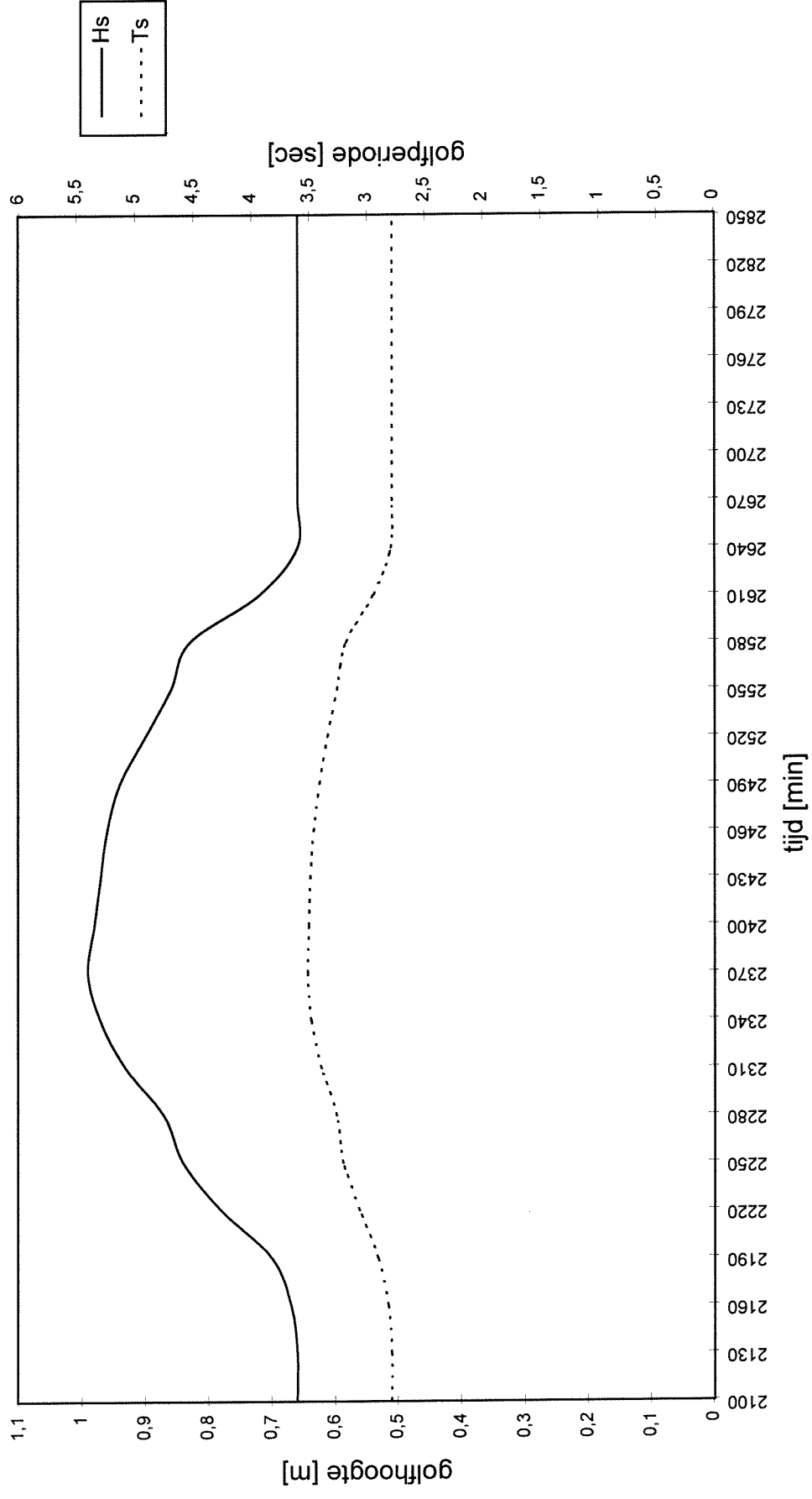
bodemprofielen
Platen van Ossensisse

BIJLAGE L

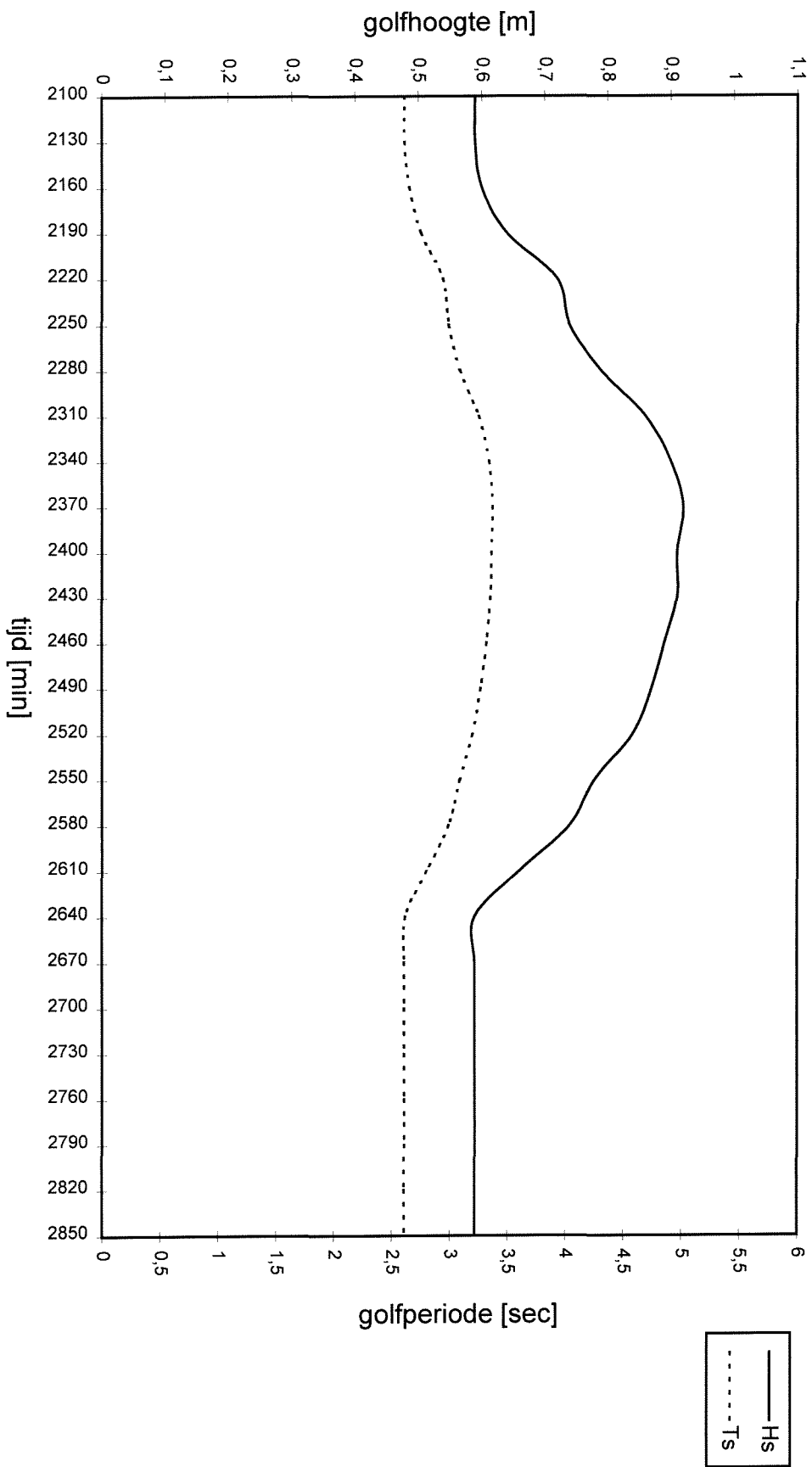
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



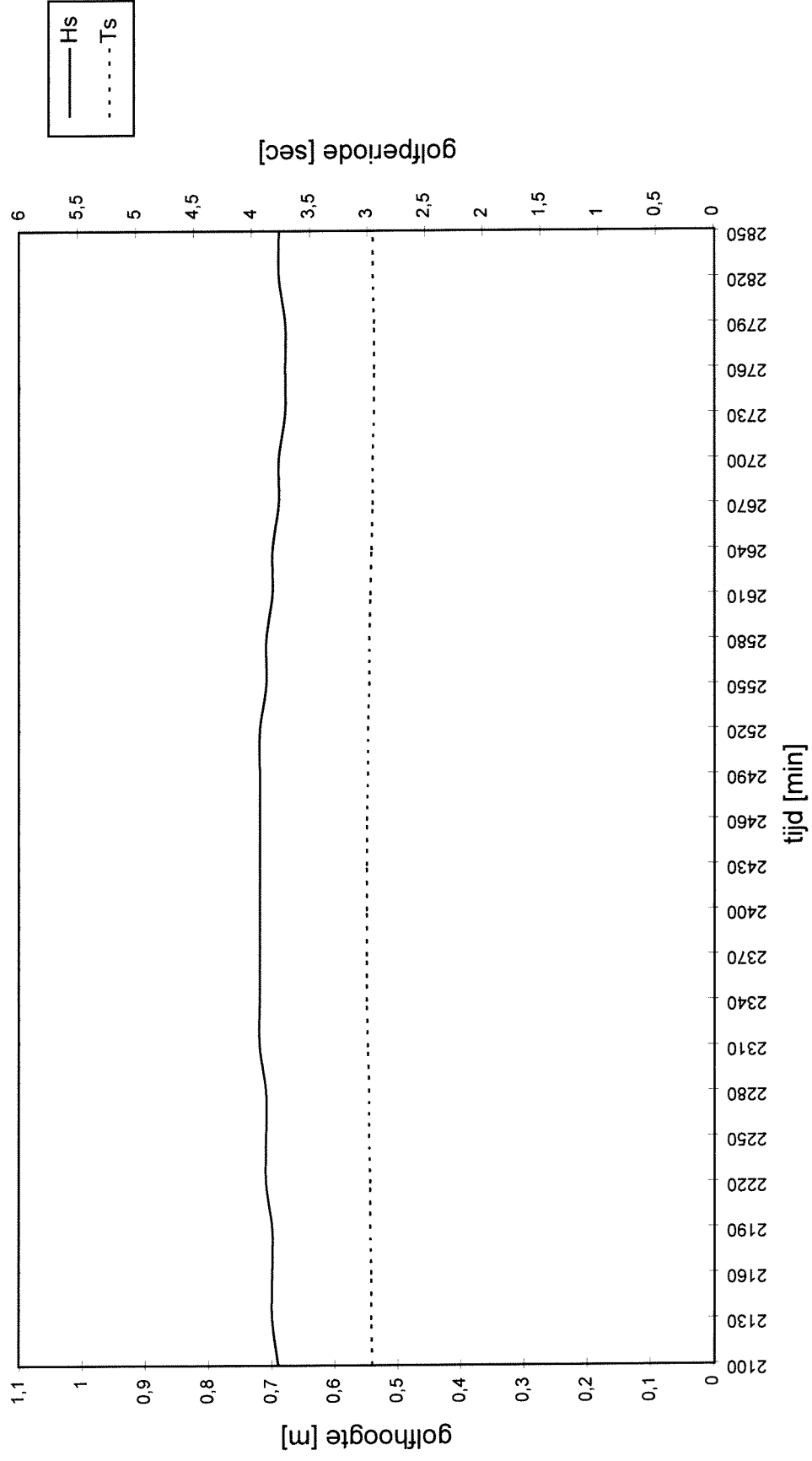
Hs en Ts in geul ten westen van PLAAT VAN OSSENISSE (wind: W-Z-W 9)

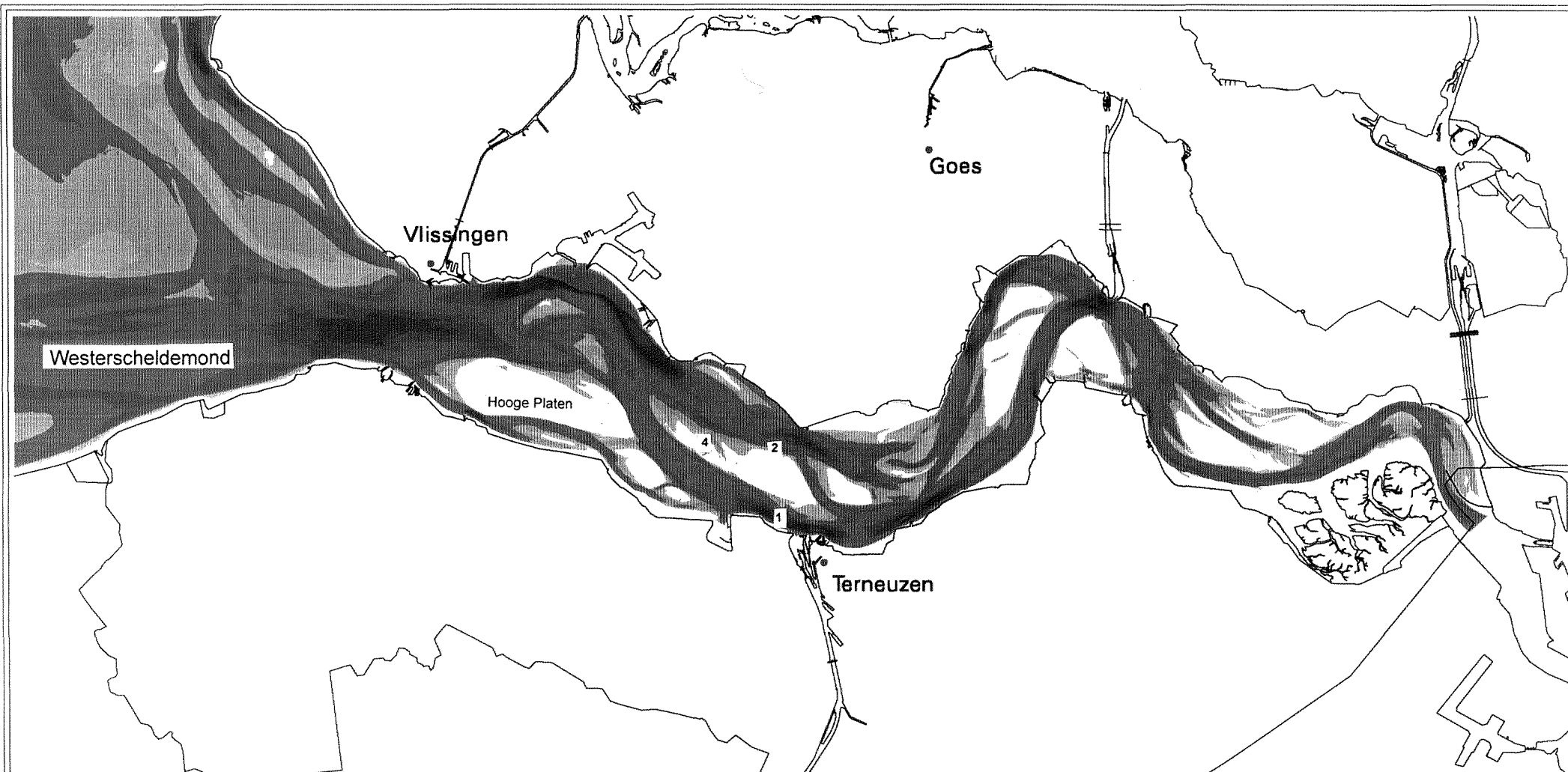


Hs en Ts in geul ten westen van PLAAT VAN OSSENISSE (wind: W-N-W 9)

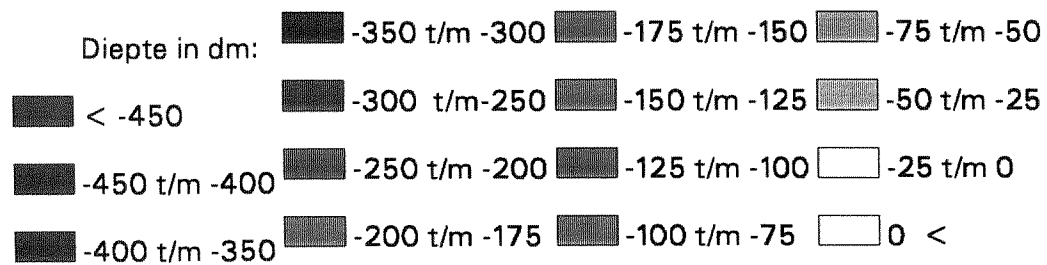


Hs en Ts in geul ten oosten van PLAAT VAN OSSENISSE (wind: O-Z-O 8)





Diepte in dm:



1 = WOVS

2 = WOVS

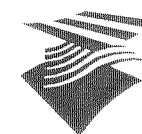
4 = WOVS

Dieptekaart Westerschelde

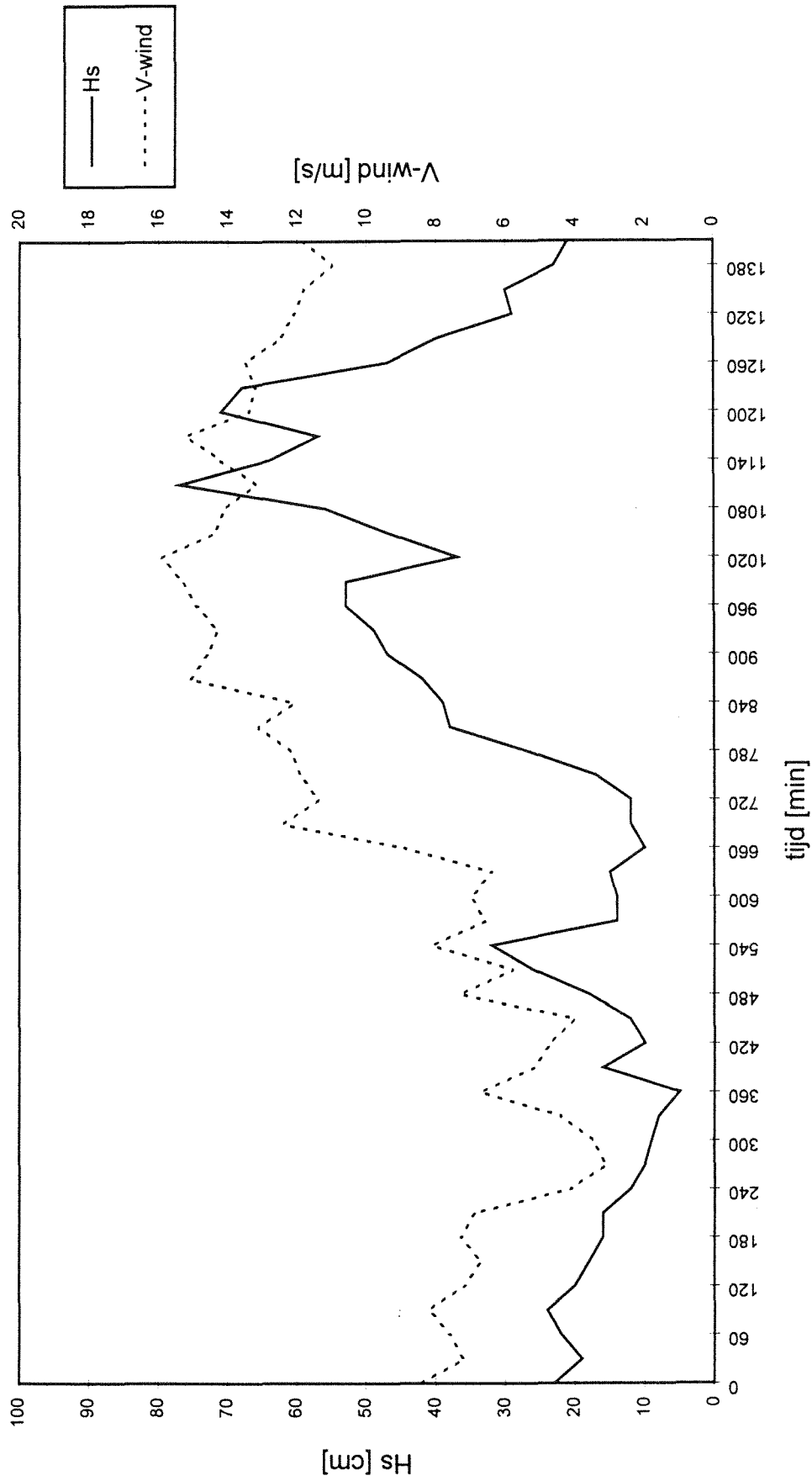
1996

Bijlage N

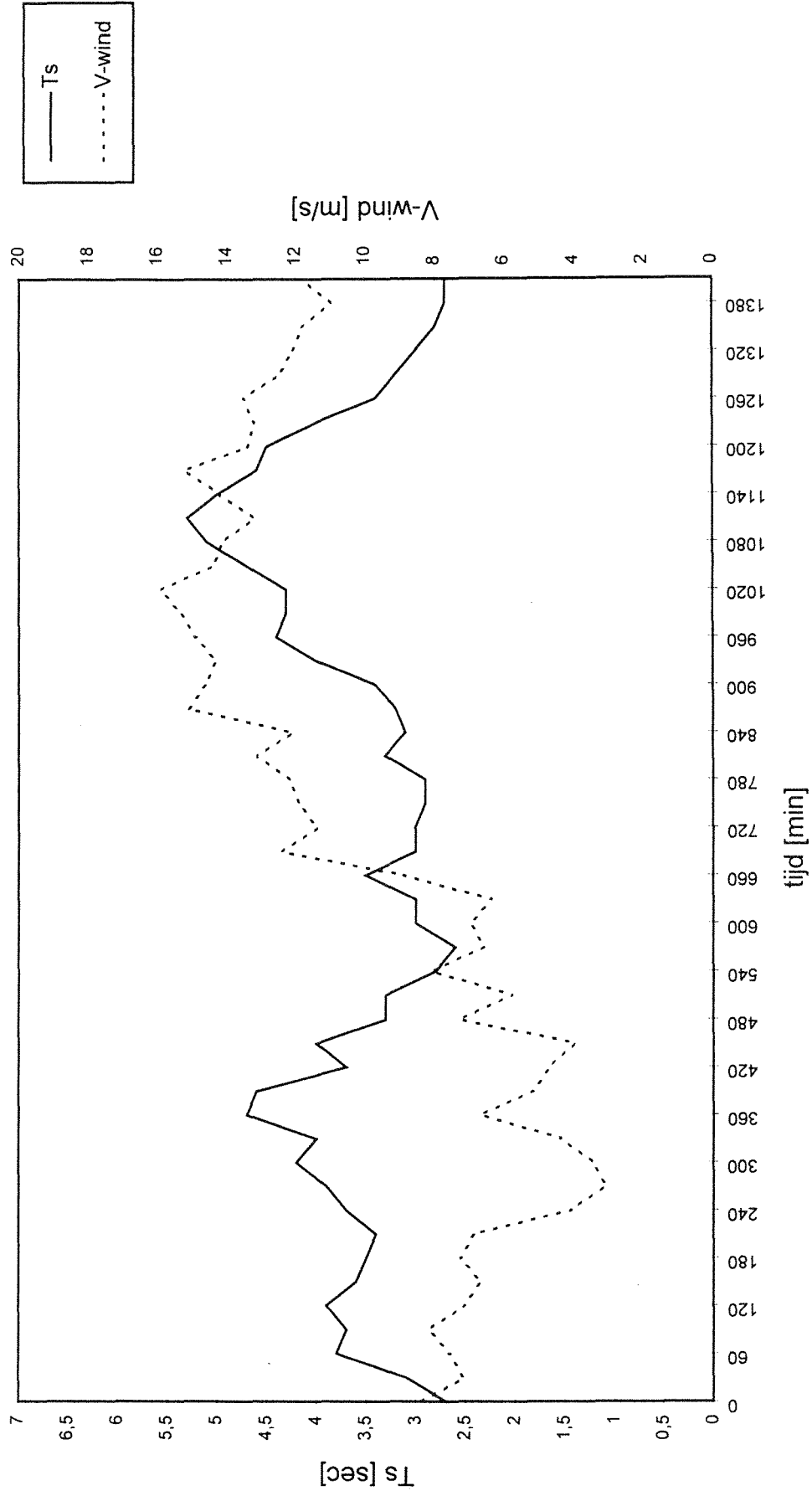
RWS Directie Zeeland, afd. AXI
21-AUG-1997



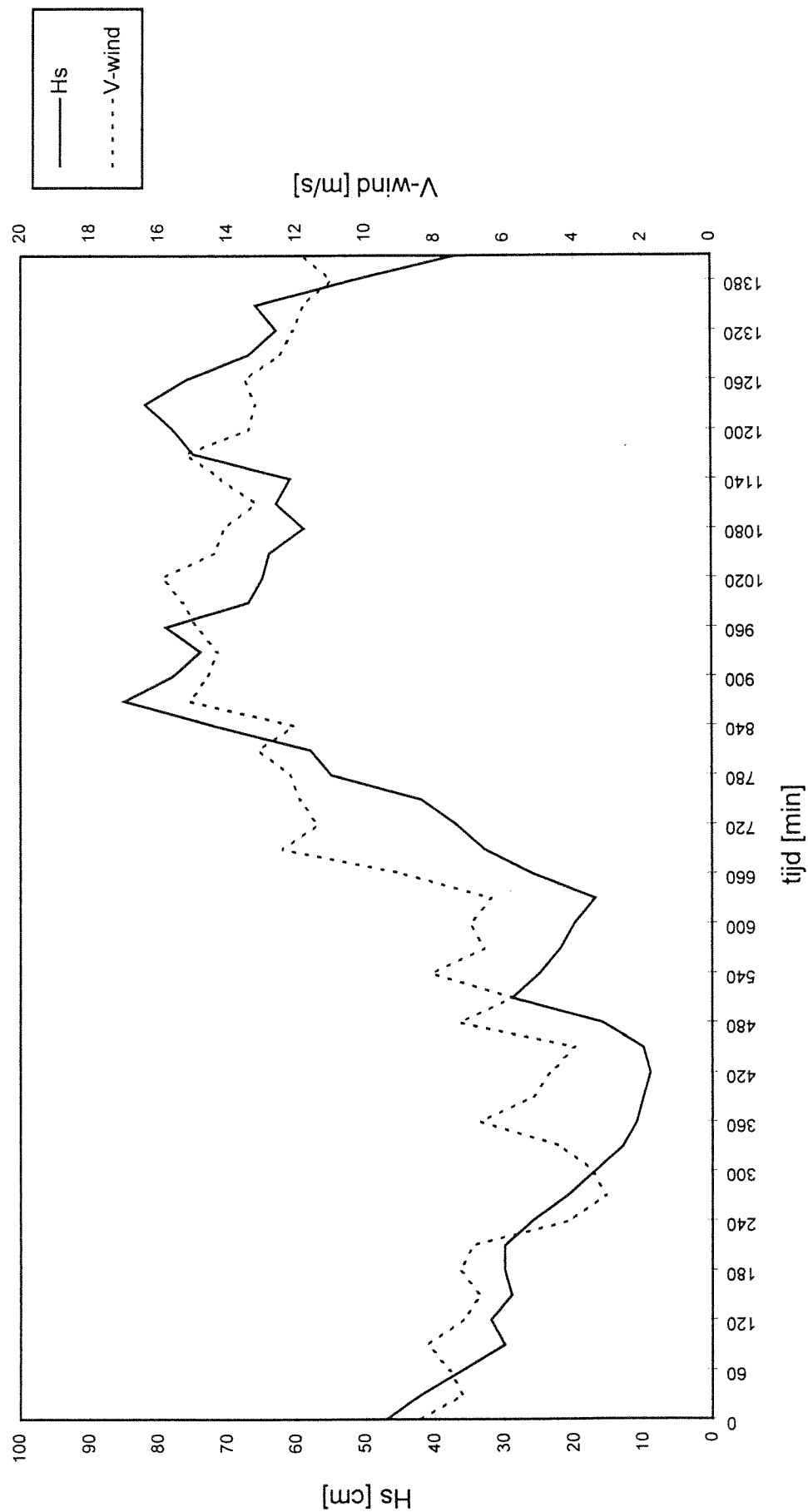
WOV1 golfhoogte (Hs) en windsnelheid (V-wind)



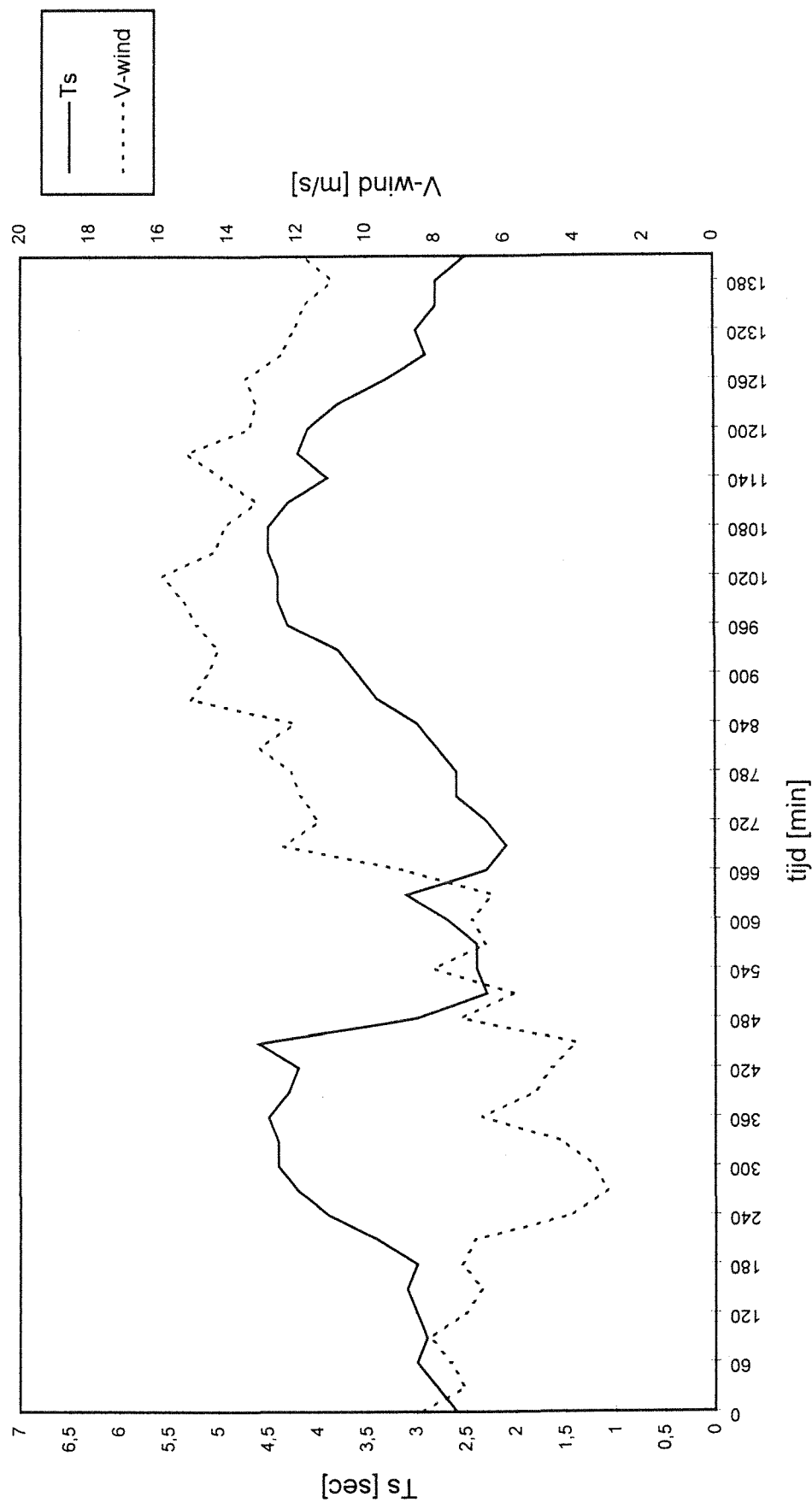
WOV1 golfperiode (T_s) en windsnelheid (V-wind)



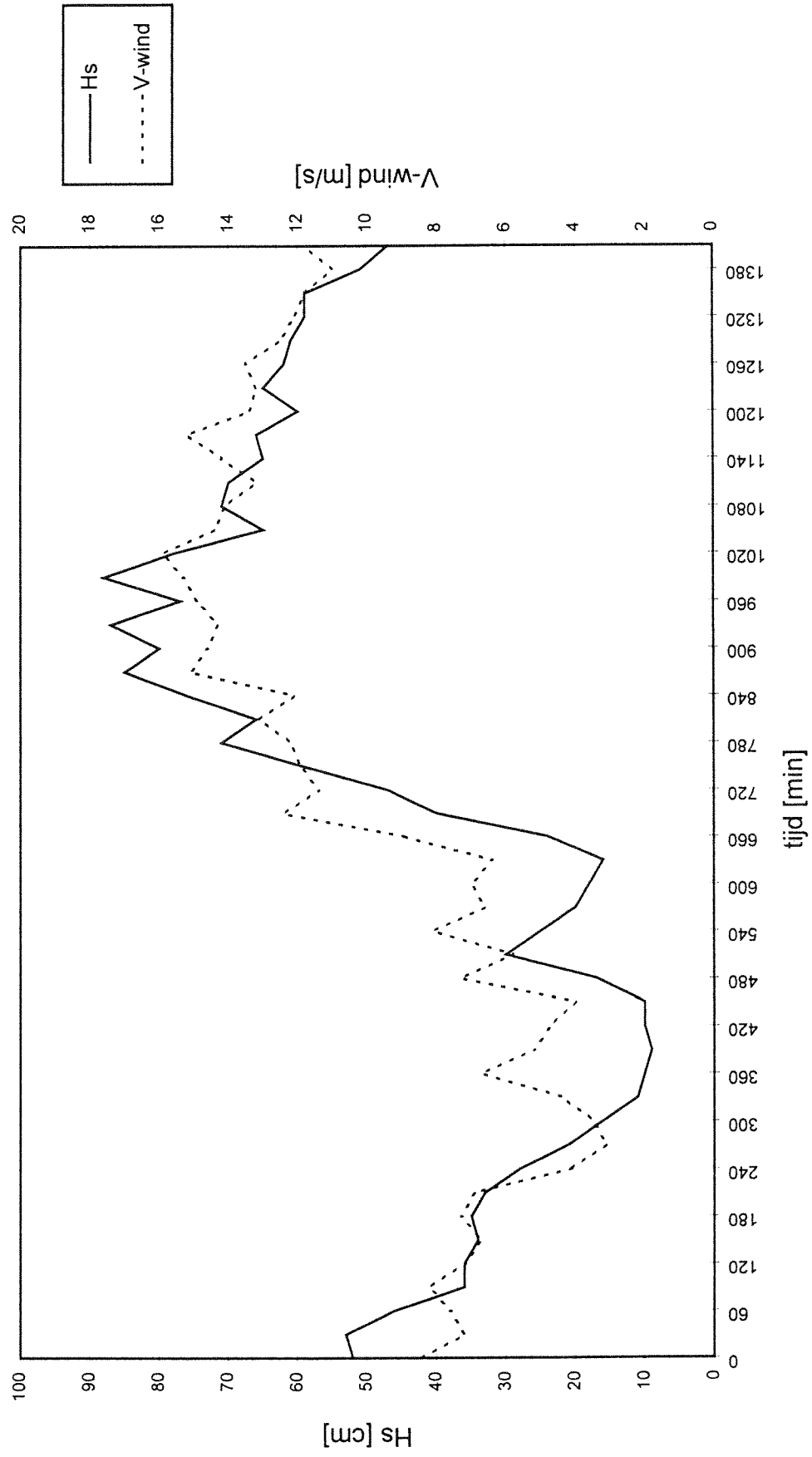
WOV2 golfhoogte (Hs) en windsnelheid (V-wind)



WOV2 golfperiode (Ts) en windsnelheid (V-wind)



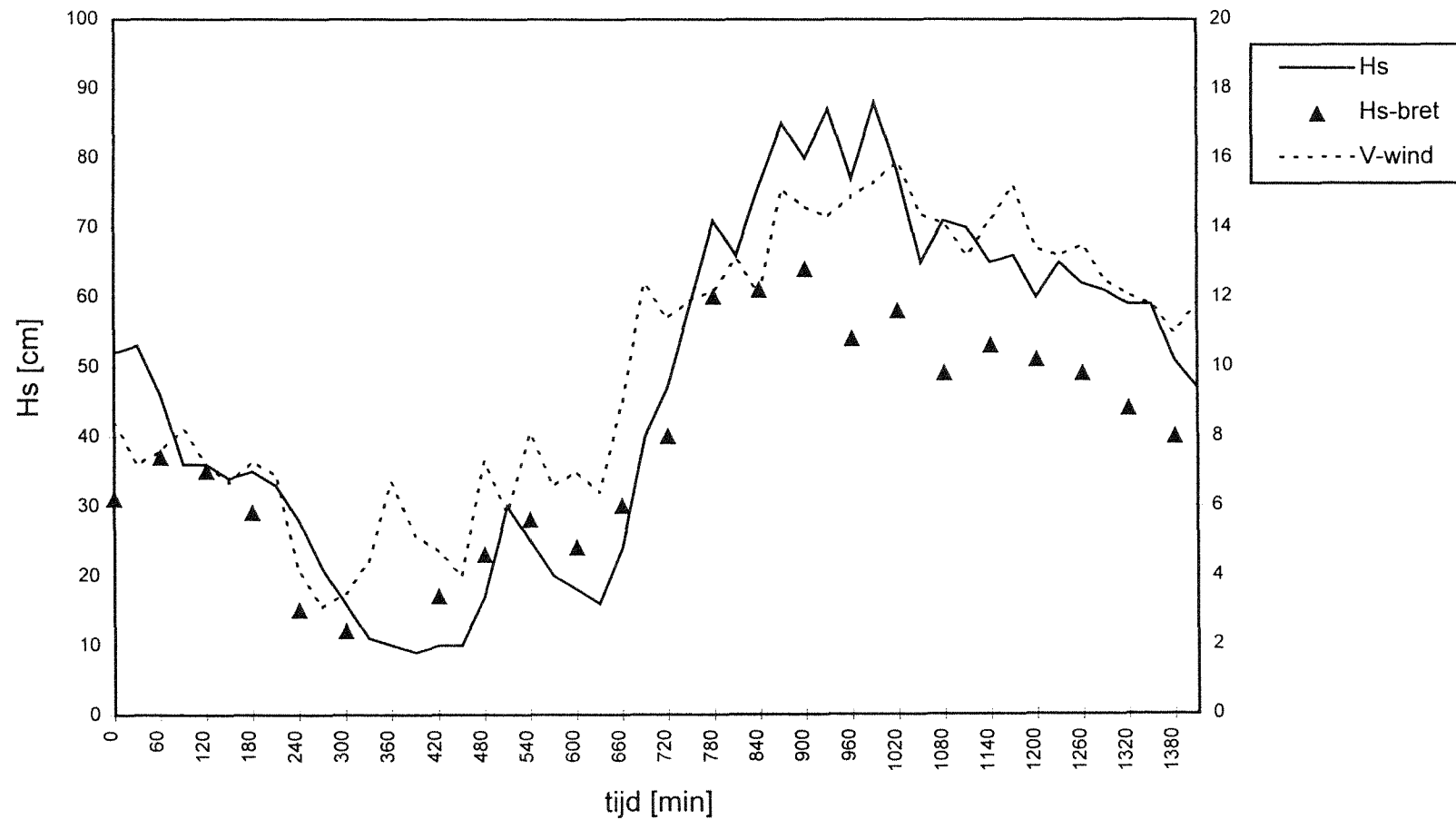
WOV4 golfhoogte (Hs) en windsnelheid (V-wind)



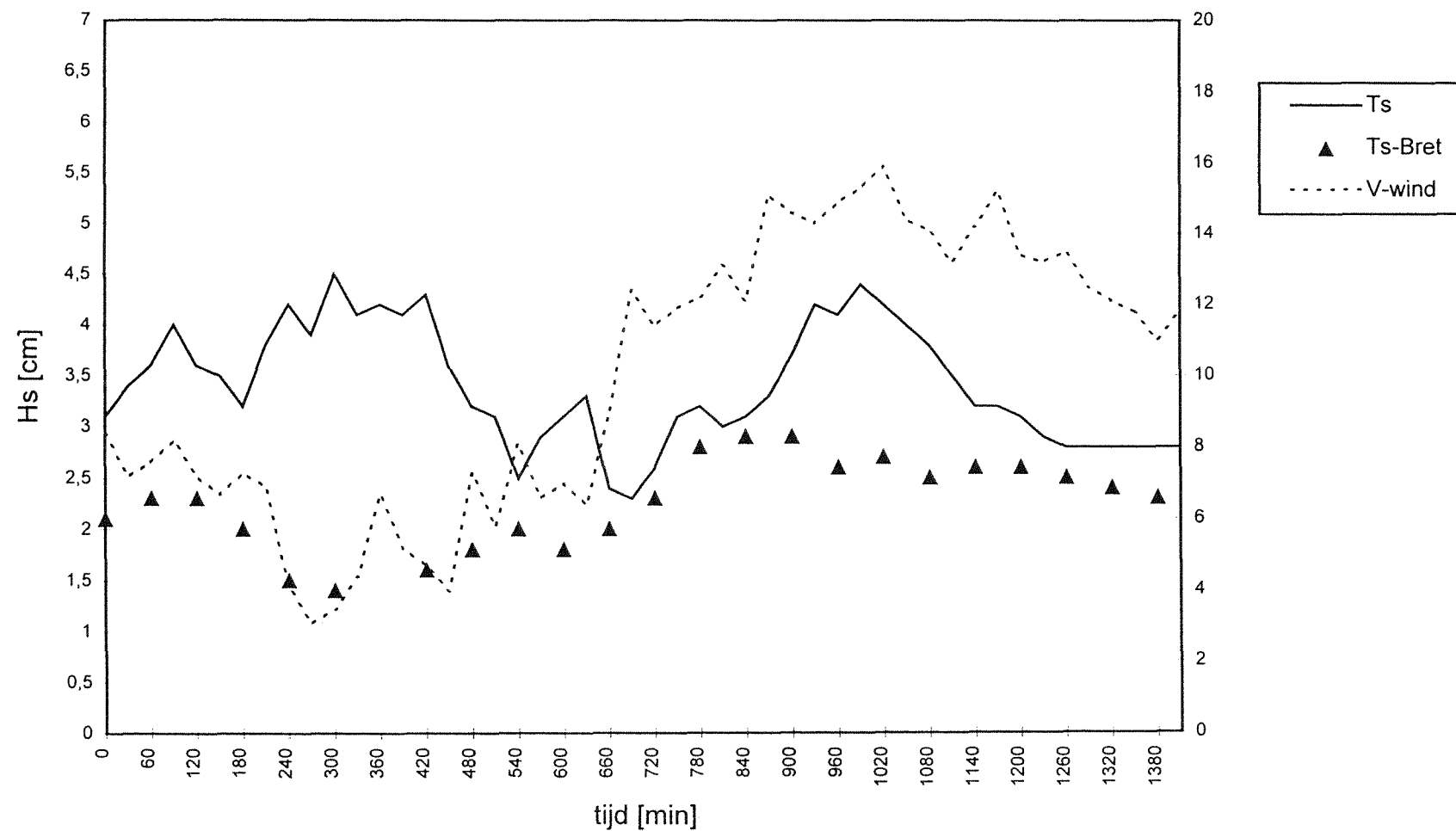
WOV4 golfperiode (T_s) en windsnelheid (V-wind)

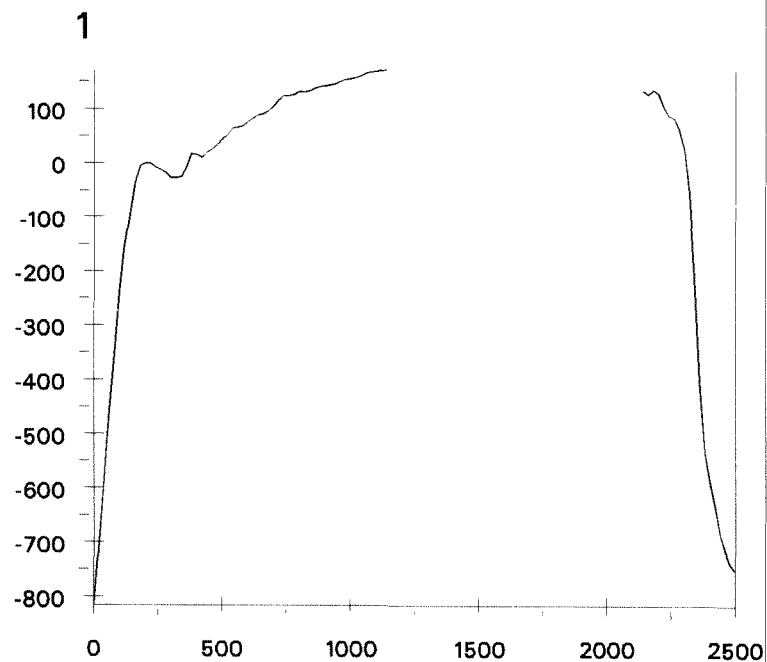
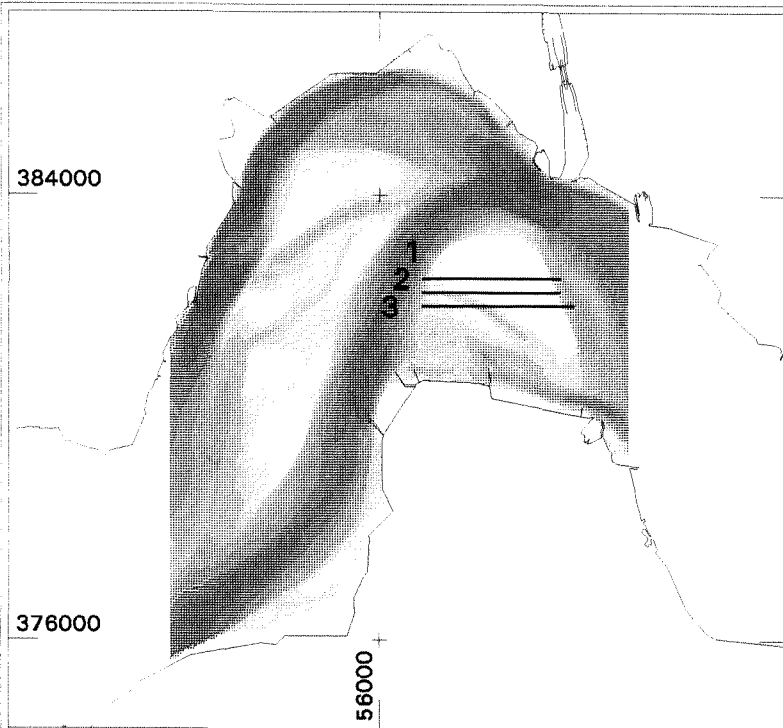


**WOV4 gemeten golfhoogte en berekende golfhoogte volgens
Bretschneider**

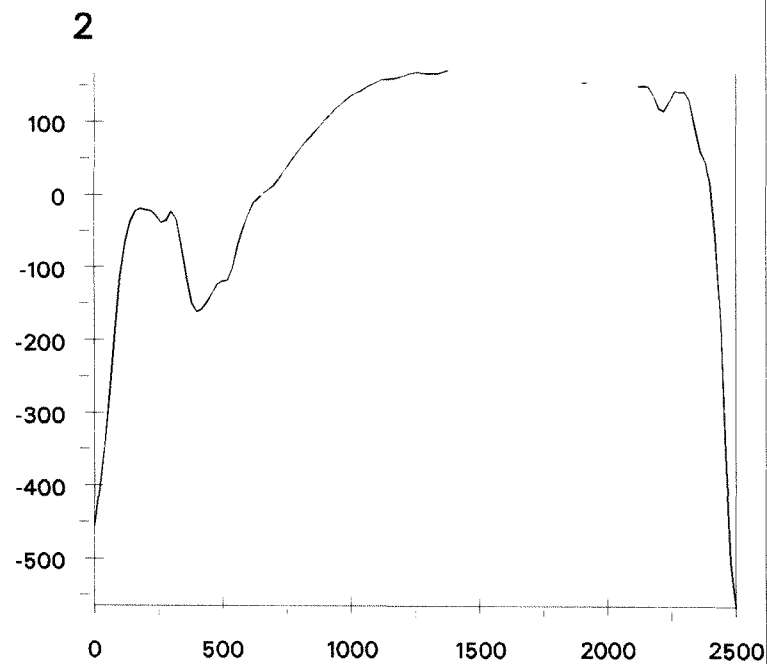
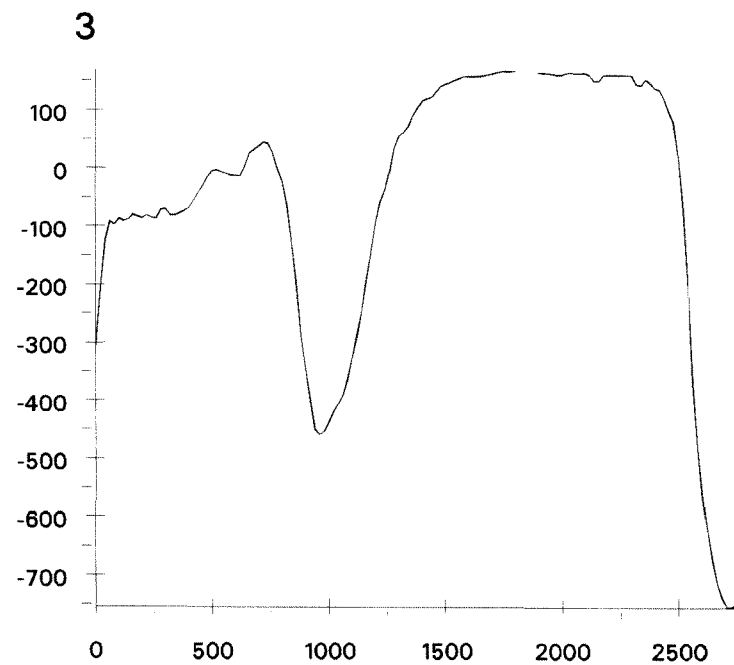


WOV4 gemeten golfperiode en berekende golfperiode volgens Bretschneider





1988



bodemprofielen
Plaat van Ossenissee

BIJLAGE Q1

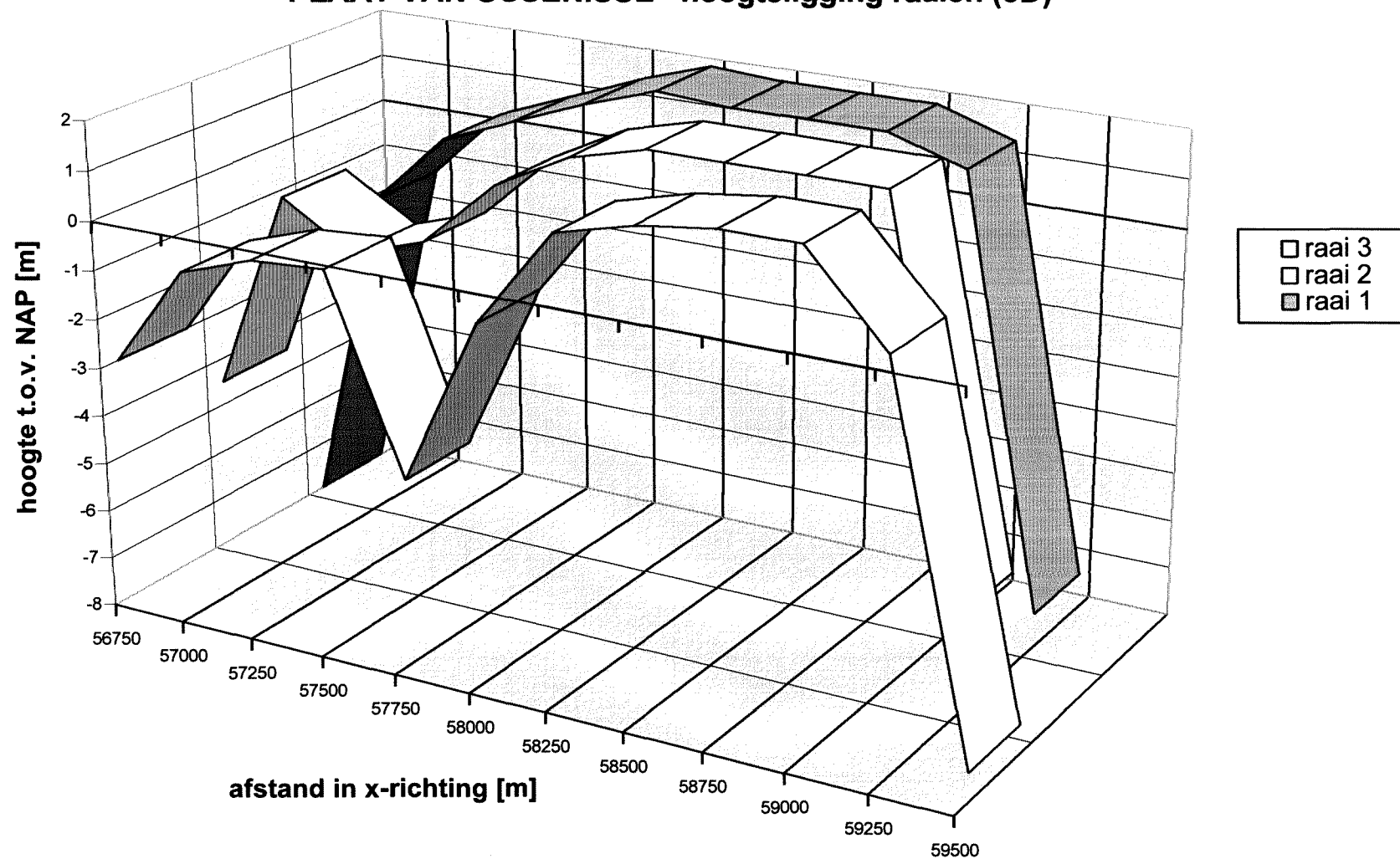
RWS Directie Zeeland, afd. NWL



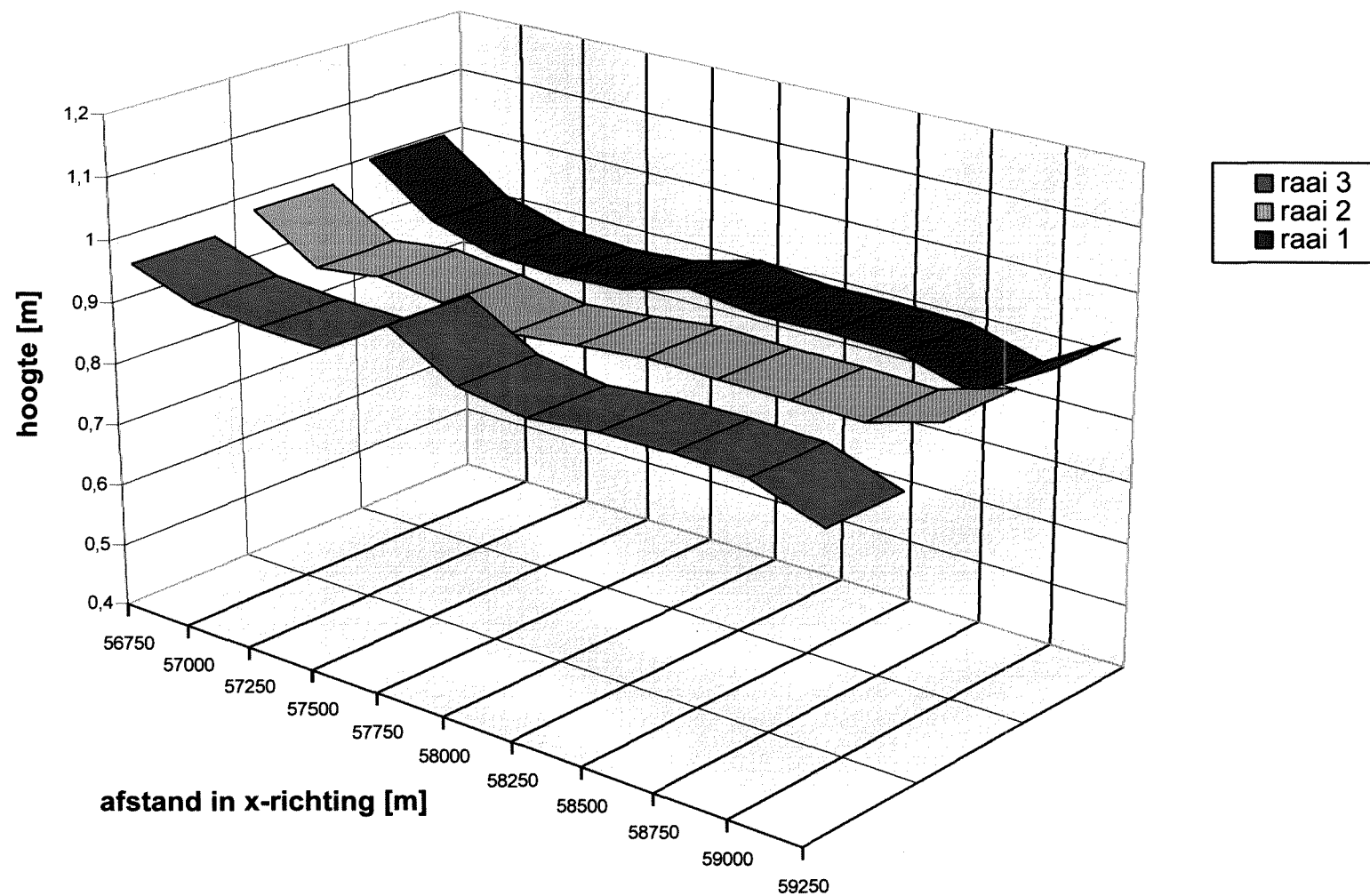
PLAAT VAN OSSENISSE hoogteligging raaien



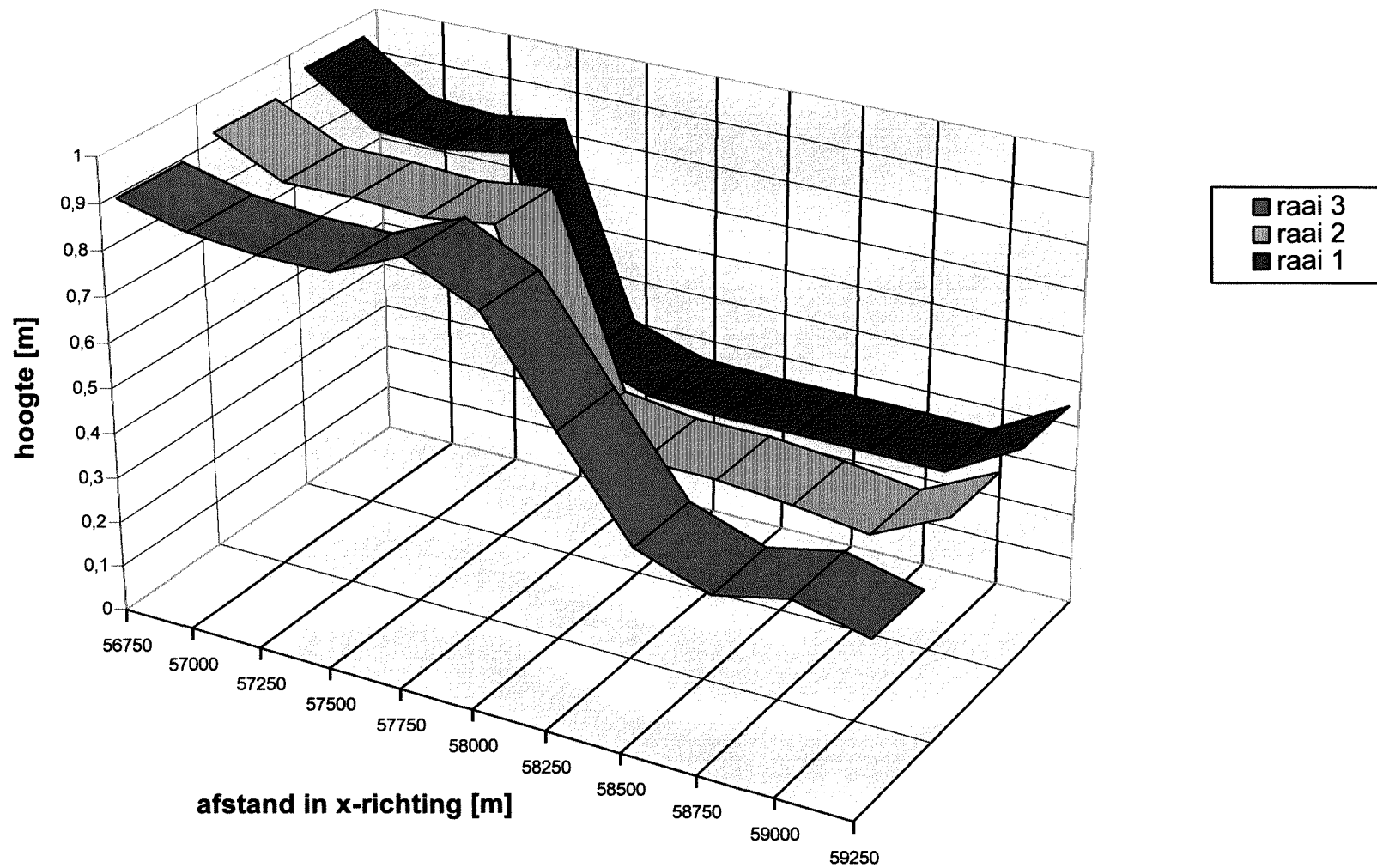
PLAAT VAN OSSENISSE hoogteligging raaien (3D)



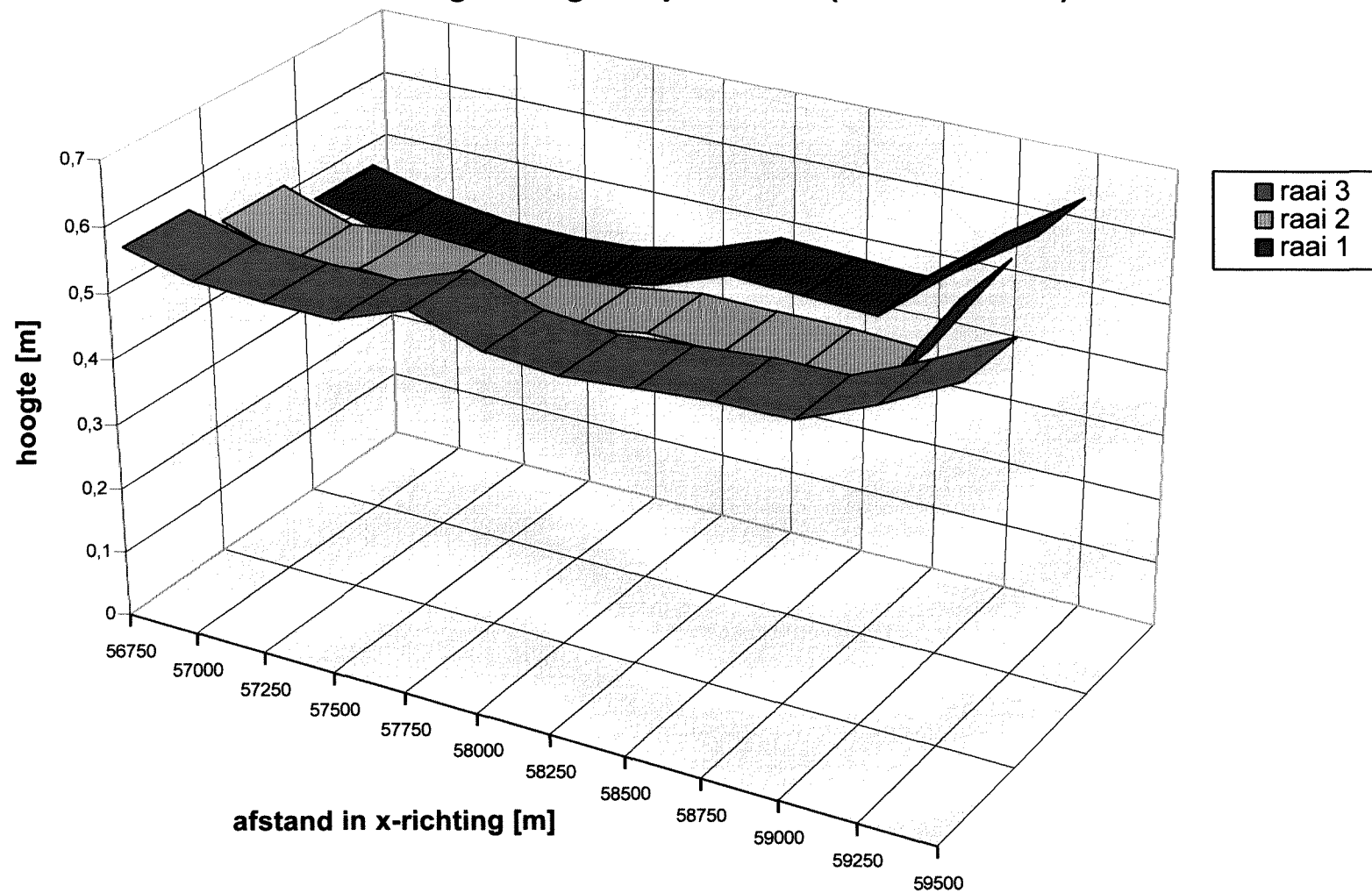
PLAAT VAN OSSENISSE golfhoogten op t = 2370 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ



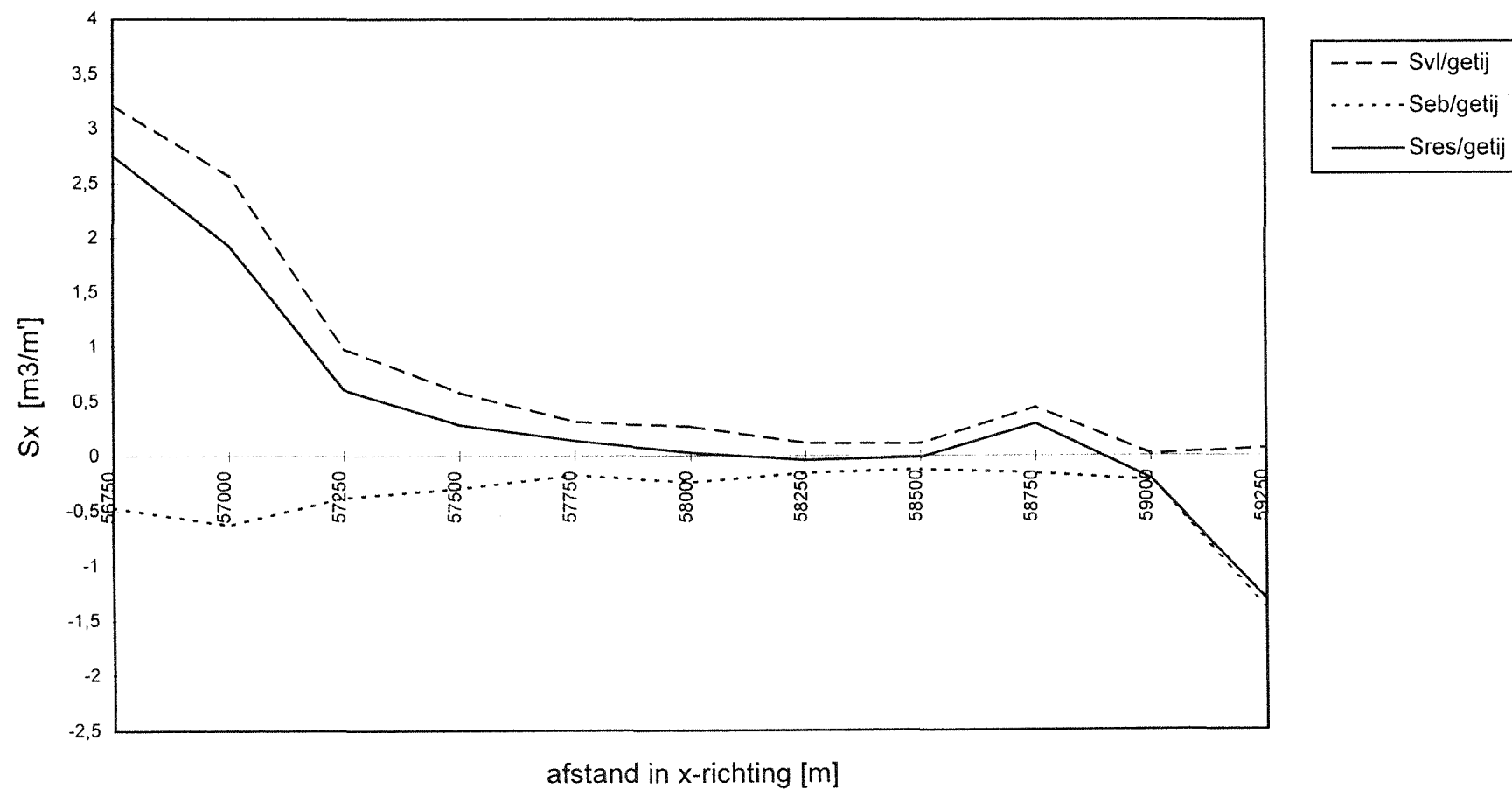
PLAAT VAN OSSENISSE golfhoogten op t = 2310 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ



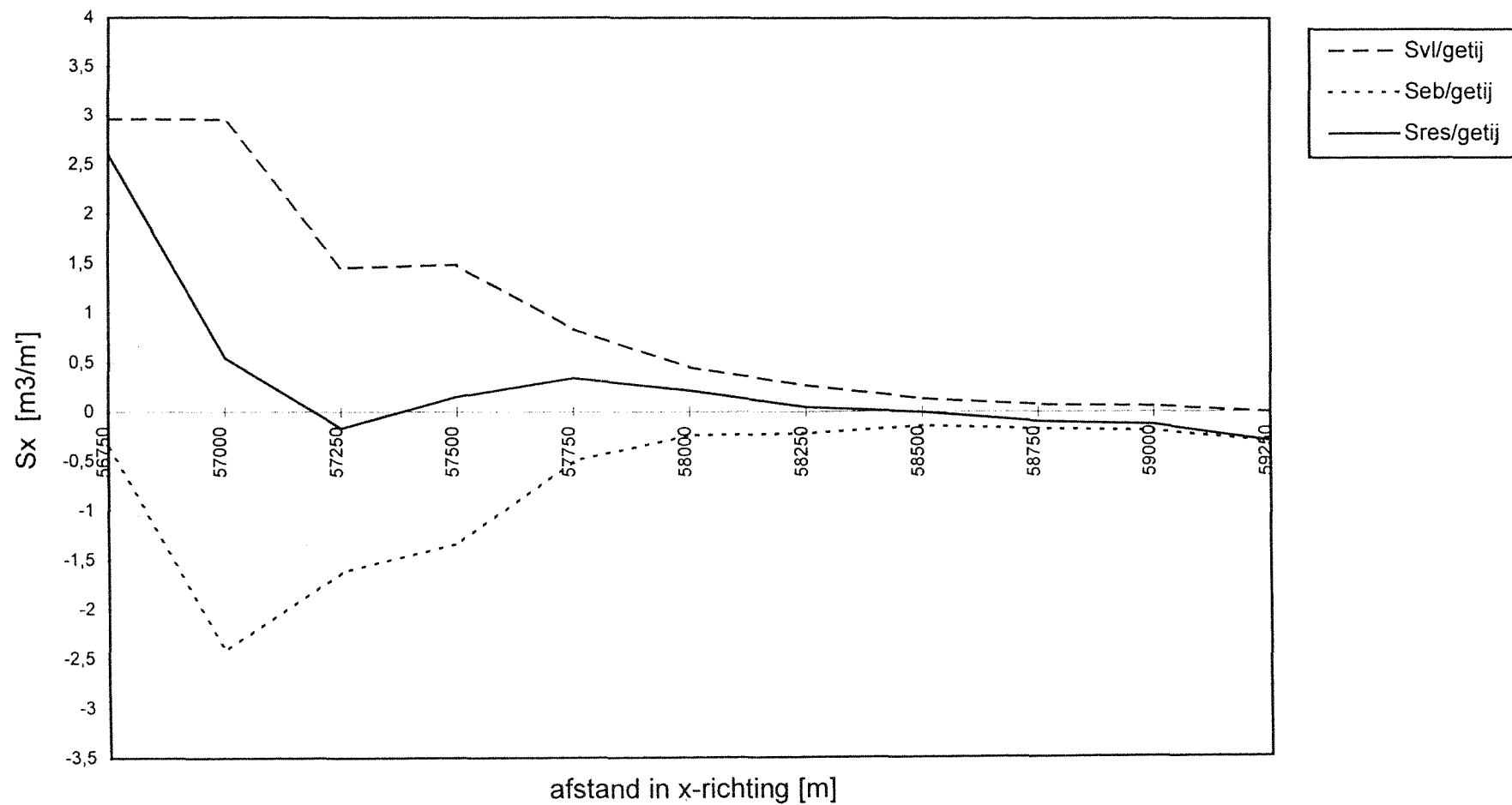
PLAAT VAN OSSENISSE golfhoogten op t = 2370 (wind: O-Z-O 8) SPRINGTIJ



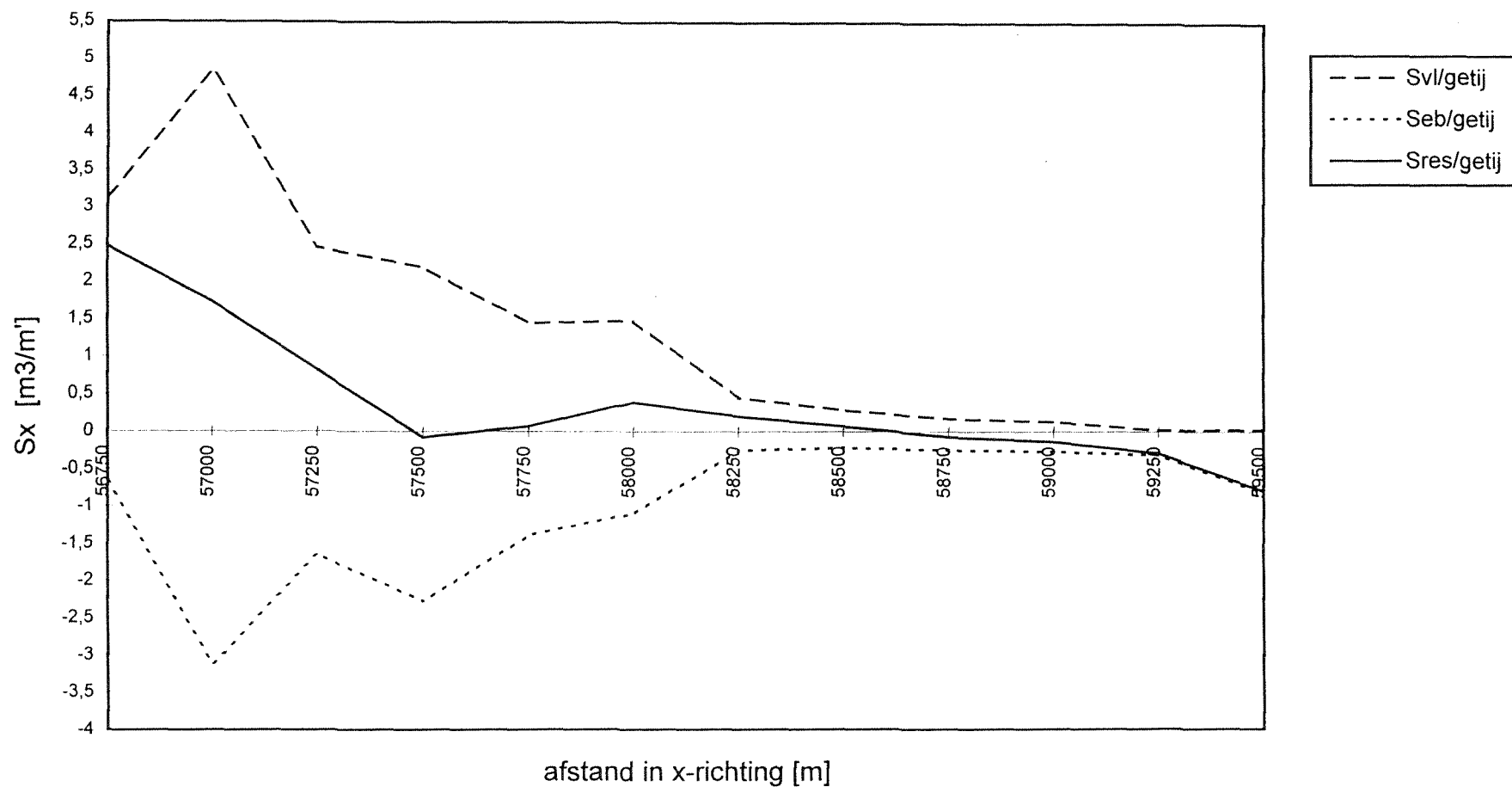
**PLAAT VAN OSSENISSE sedimenttransport RAAI 1 (wind: W-Z-W 9)
SPRINGTIJ**



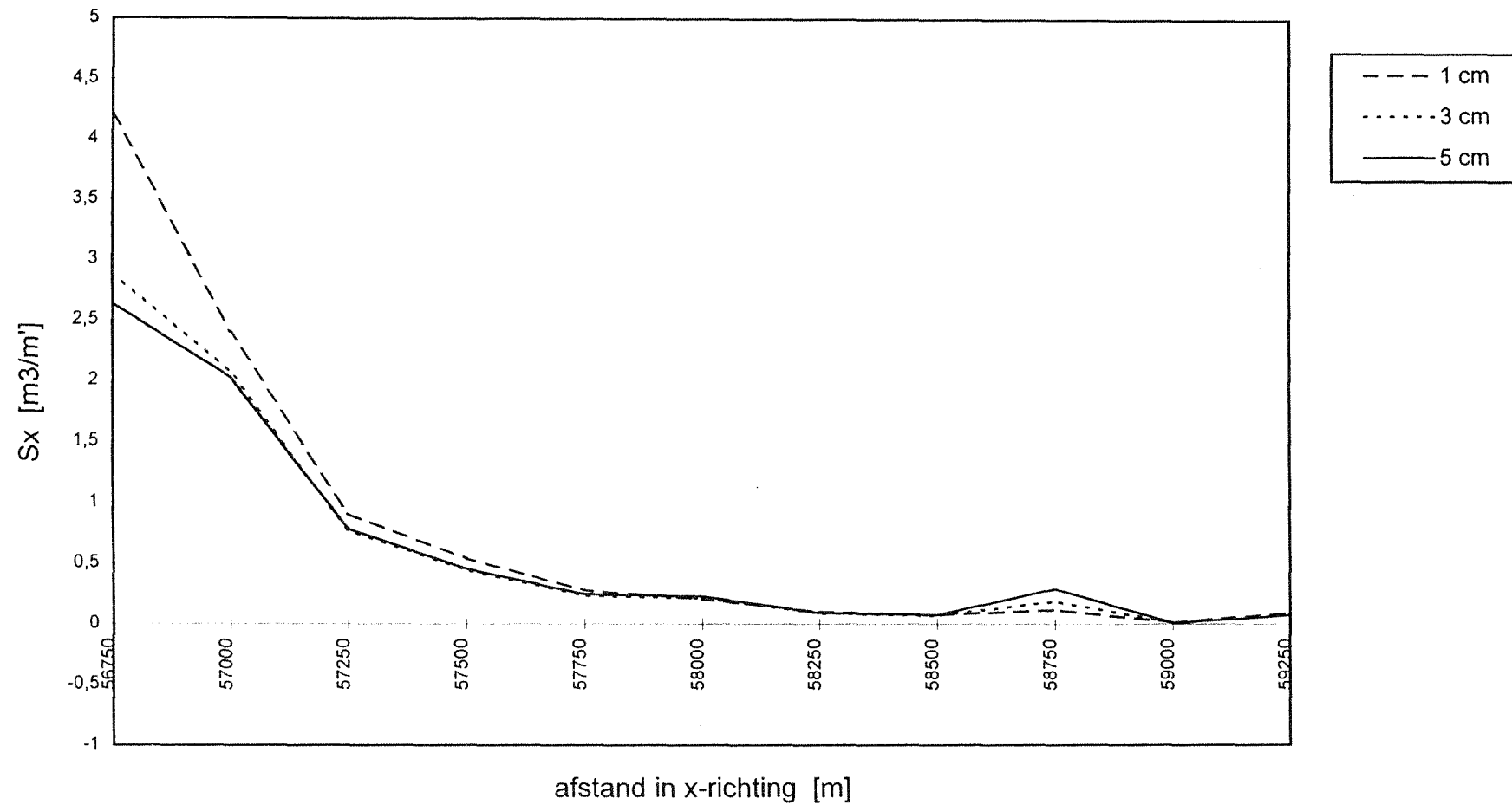
**PLAAT VAN OSSENISSE sedimenttransport RAAI 2 (wind: W-Z-W 9)
SPRINGTIJ**



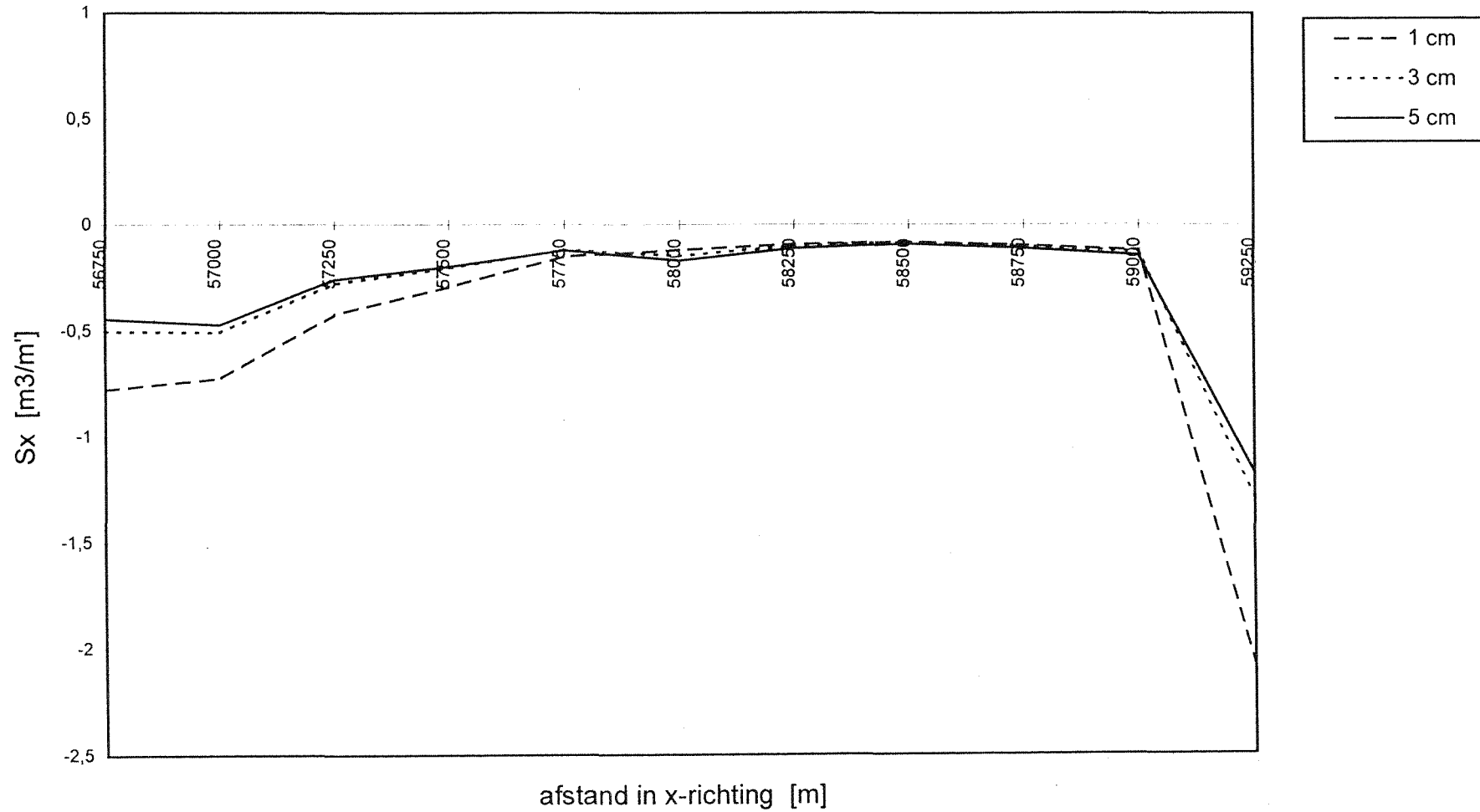
**PLAAT VAN OSSENISSE sedimenttransport RAAI 3 (wind: W-Z-W 9)
SPRINGTIJ**



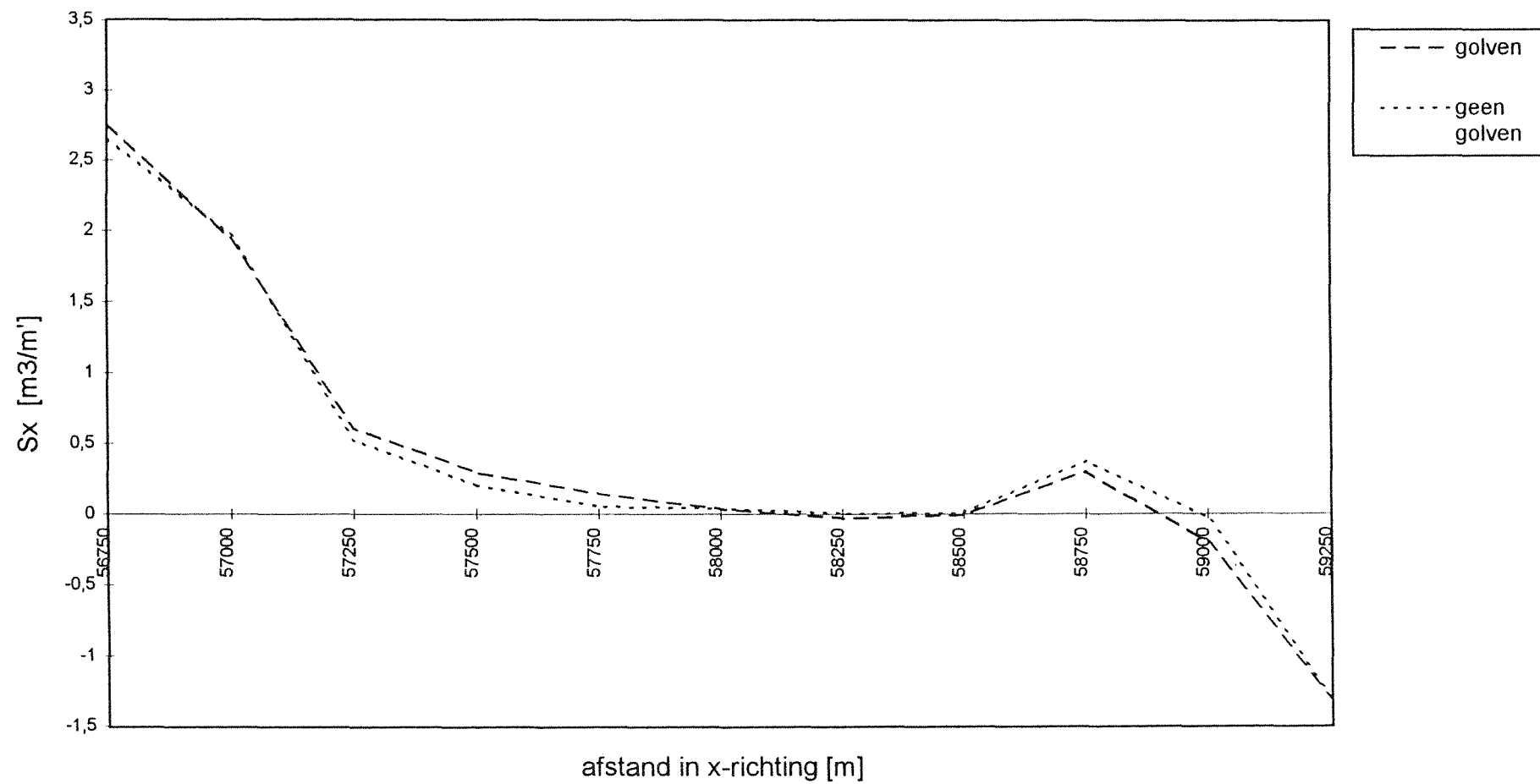
**PLAAT VAN OSSENISSE vloedsedimenttransport RAAI 1
voor verschillende waarden van r**



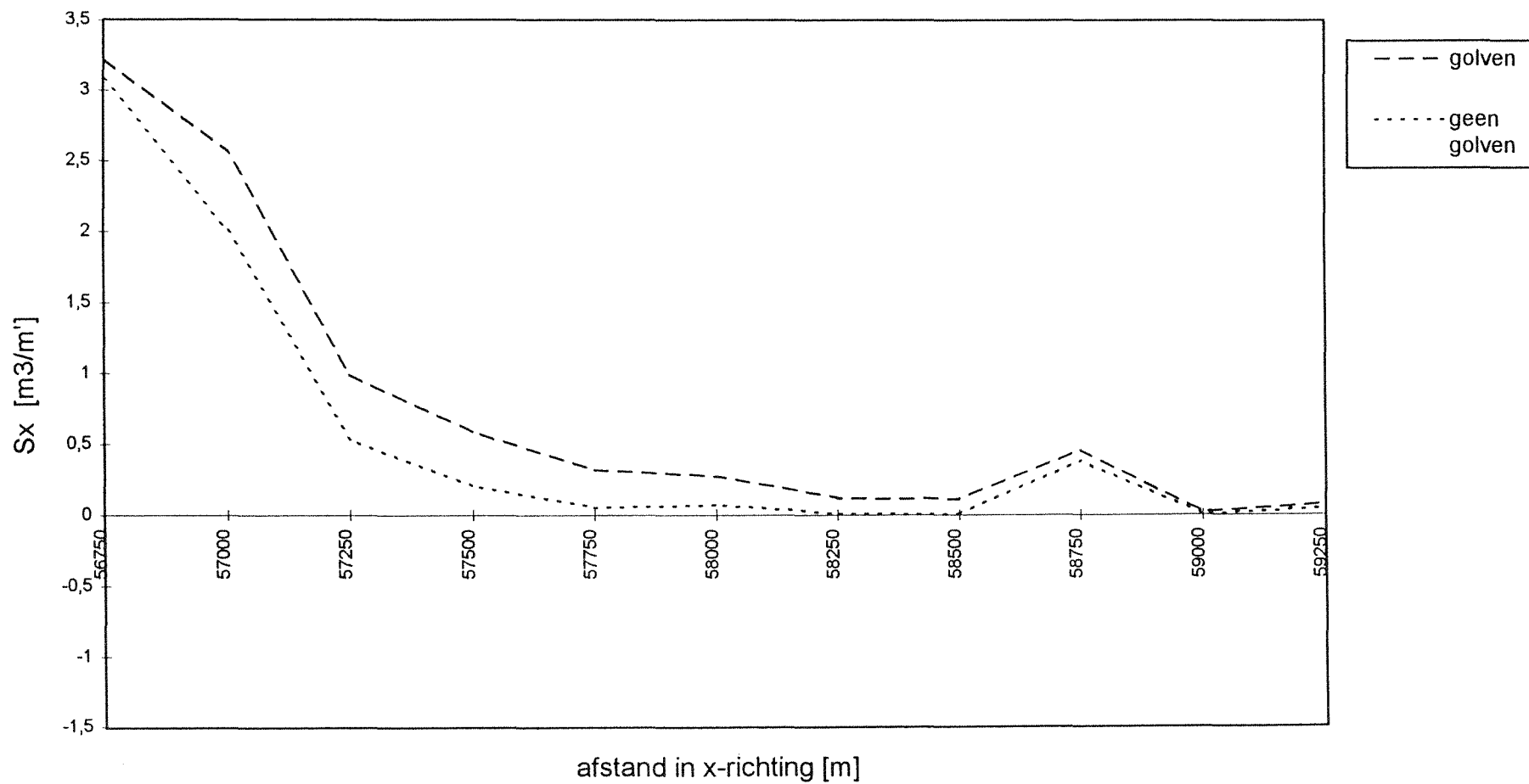
PLAAT VAN OSSENISSE ebsedimenttransport RAAI 1
voor verschillende waarden van r



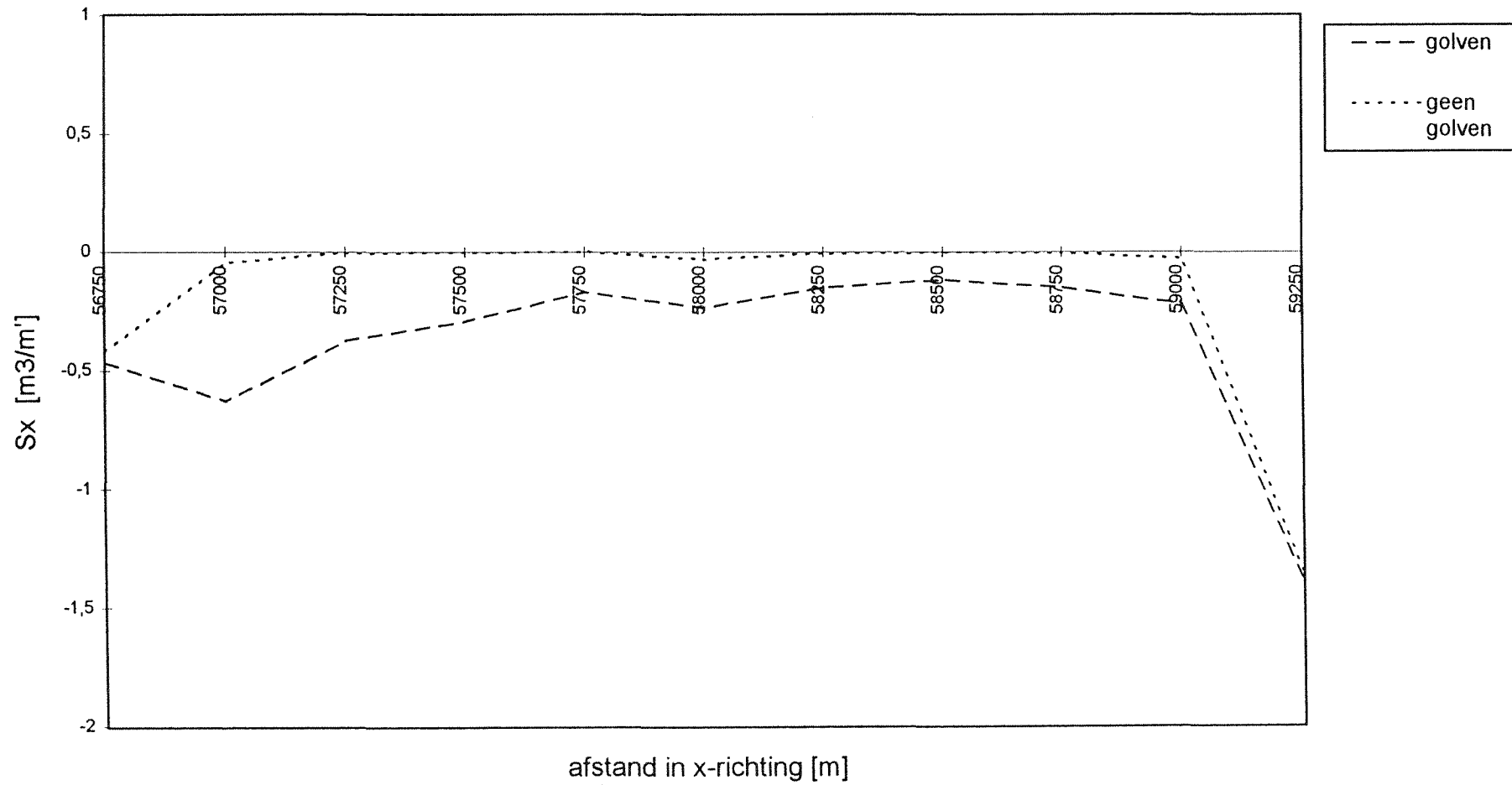
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
resultierend sedimenttransport met en zonder golfwerking



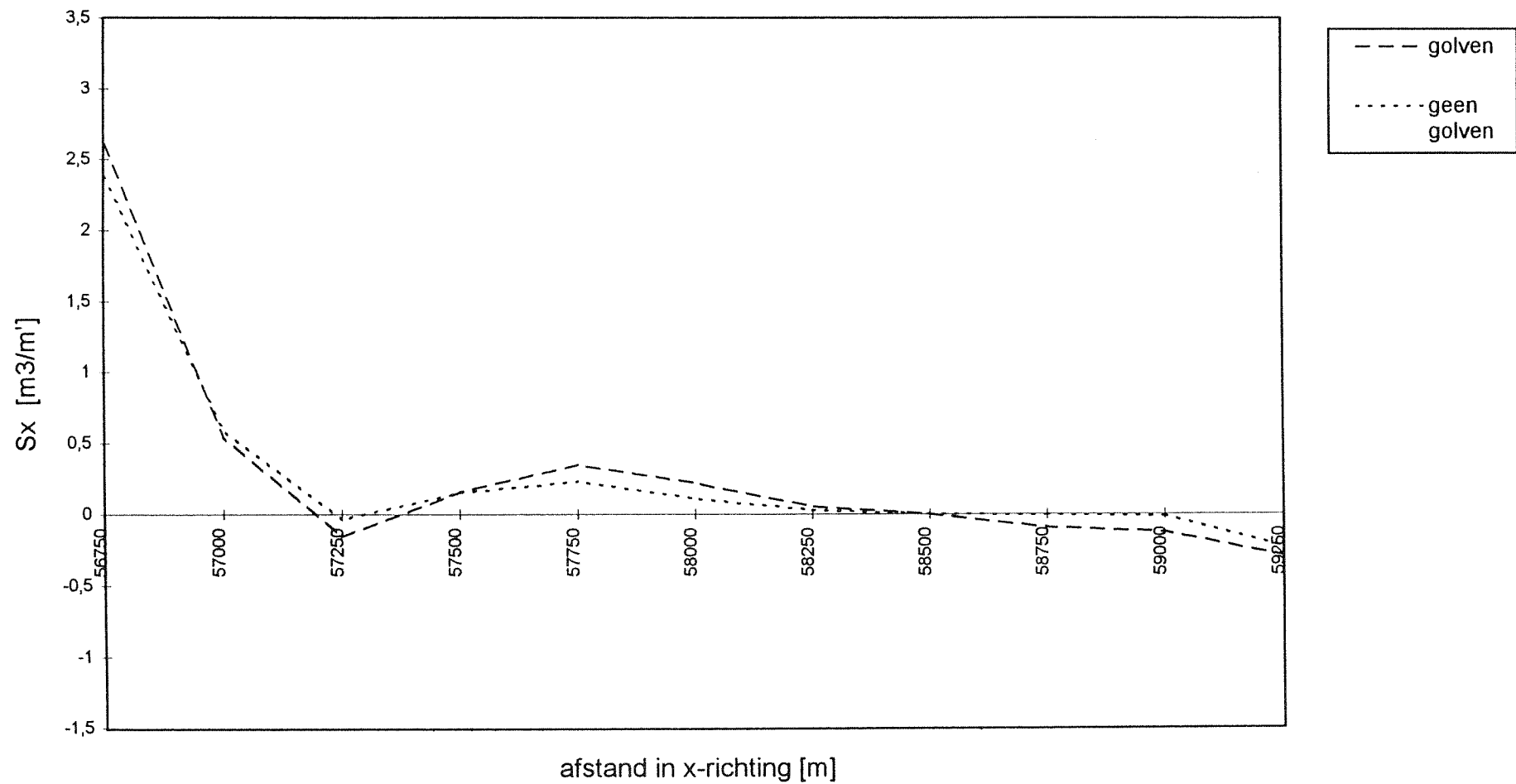
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
vloedsedimenttransport met en zonder golfwerking



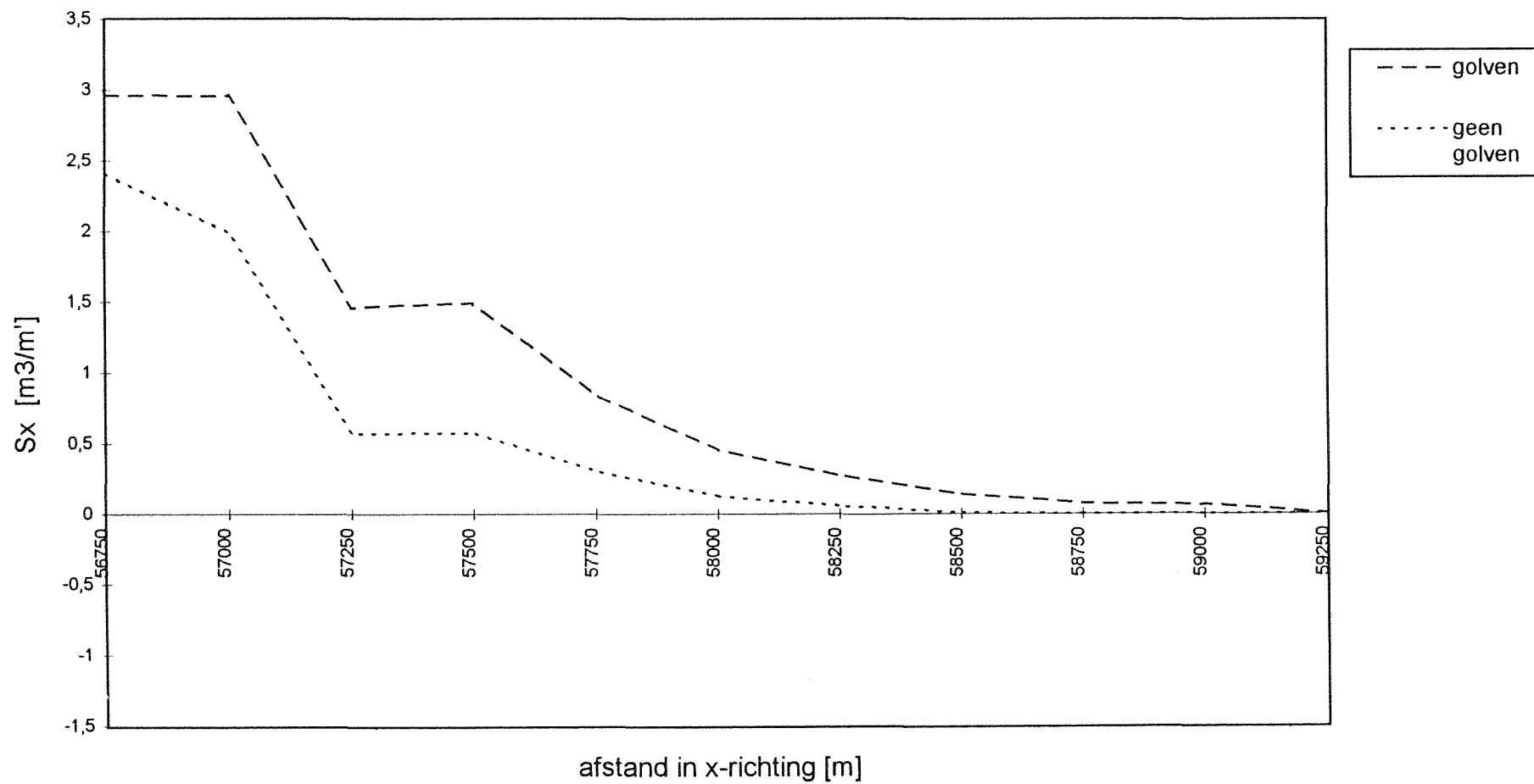
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
eb sedimenttransport met en zonder golfwerking



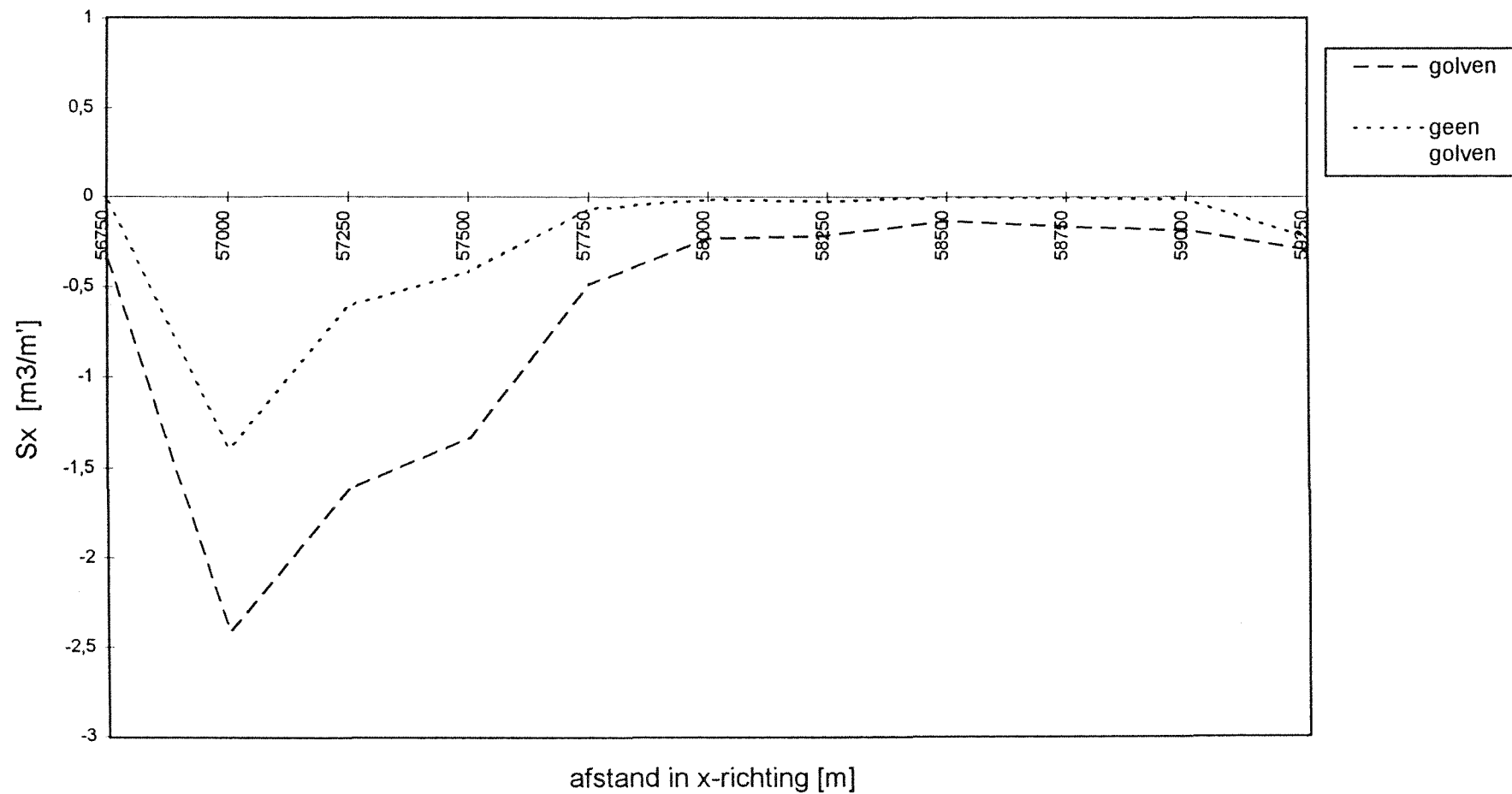
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 2 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
resultierend sedimenttransport met en zonder golfwerking



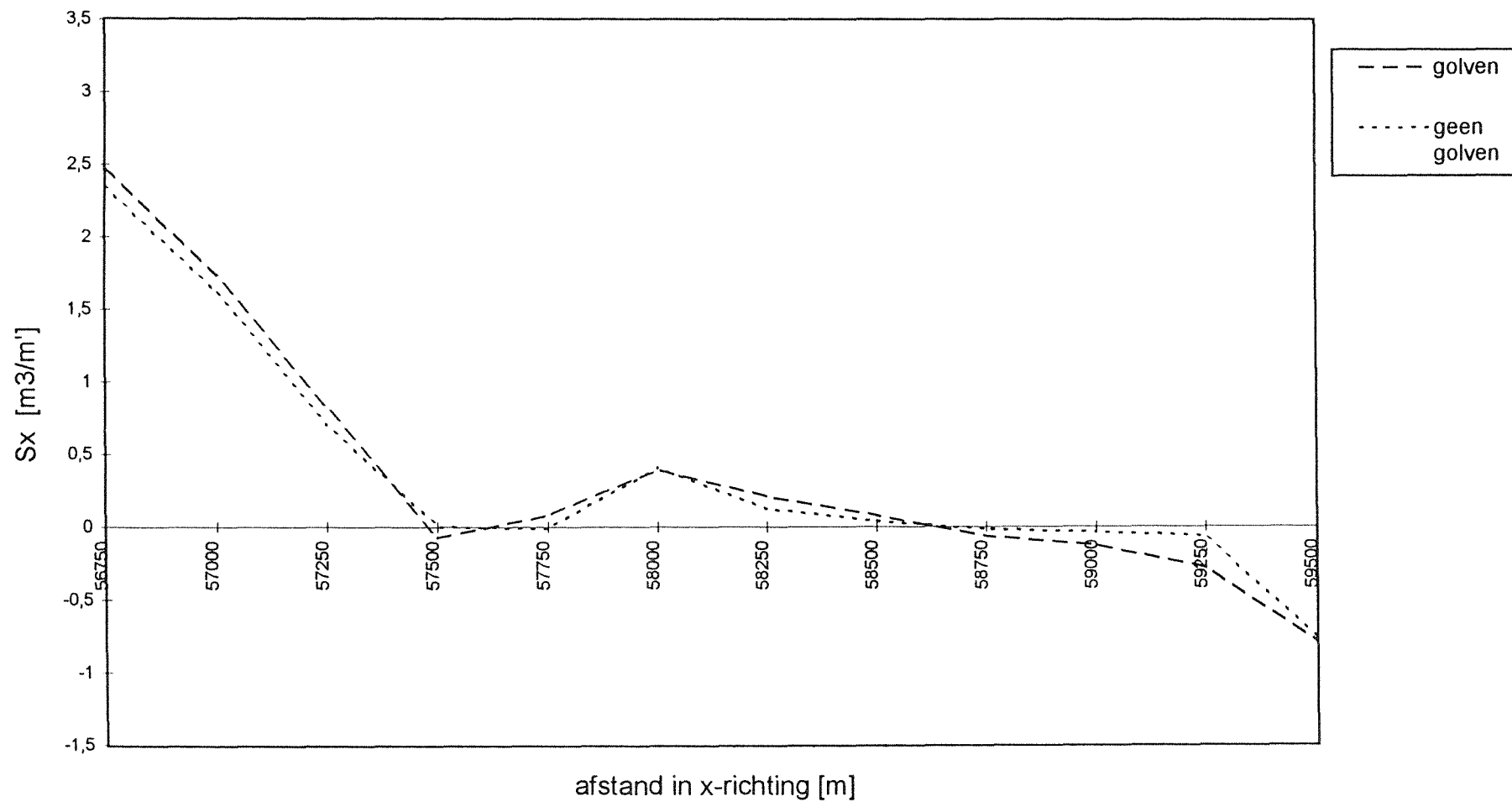
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 2 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
vloedsedimenttransport met en zonder golfwerking



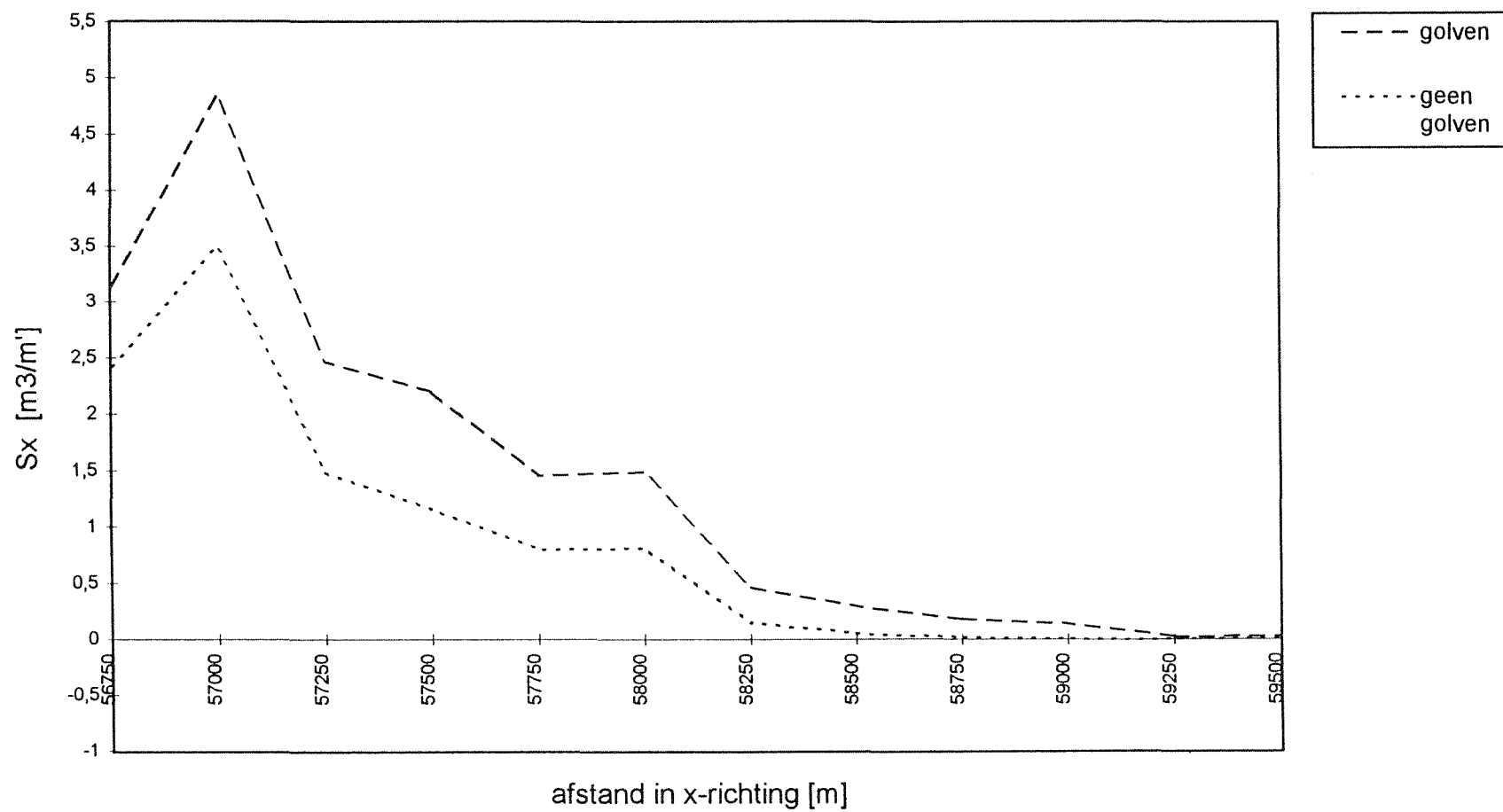
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 2 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
eb sedimenttransport met en zonder golfwerking



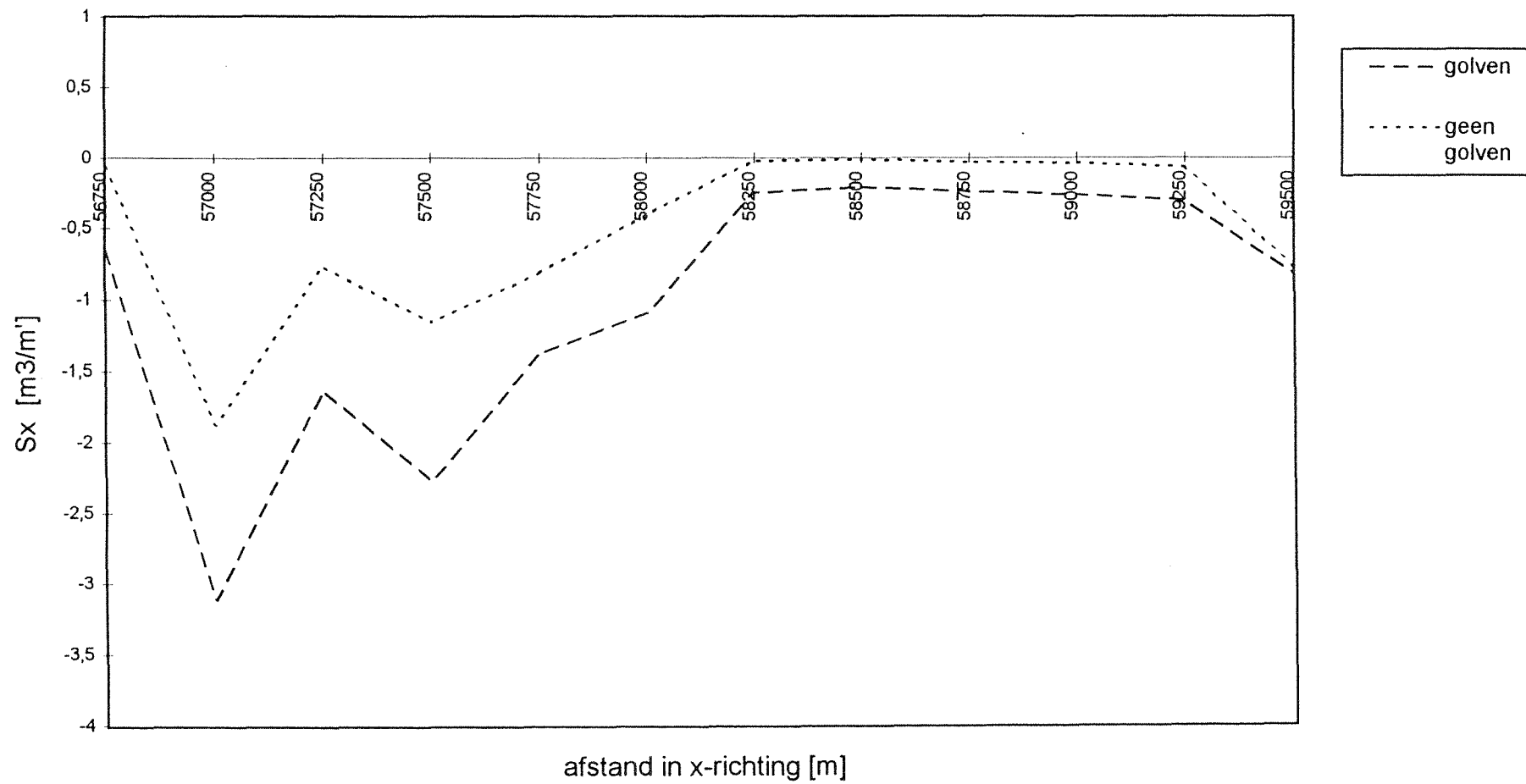
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 3 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
resultierend sedimenttransport met en zonder golfwerking



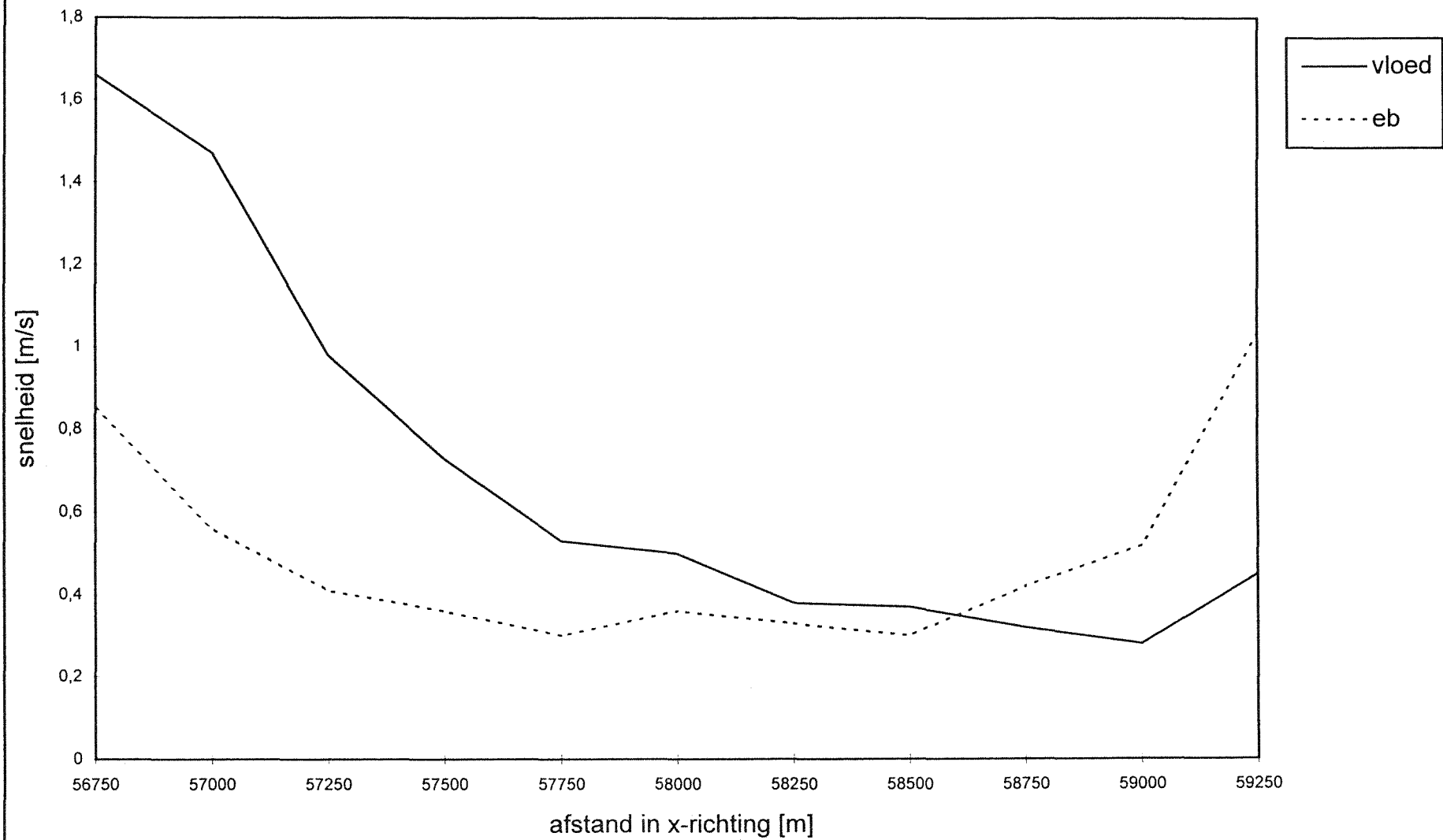
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 3 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
vloedsedimenttransport met en zonder golfwerking



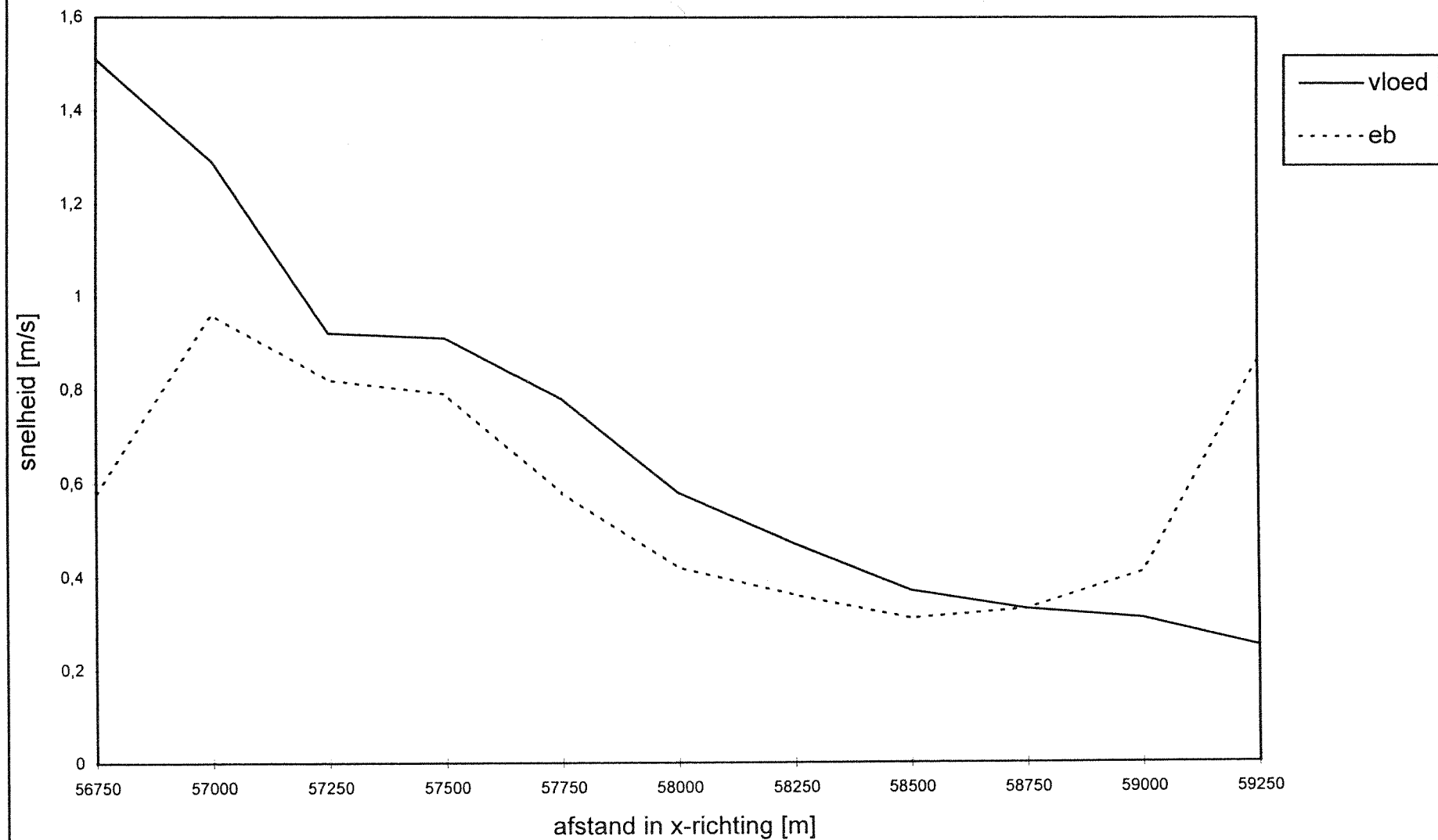
PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 3 (wind: W-Z-W 9) SPRINGTIJ
eb sedimenttransport met en zonder golfwerking



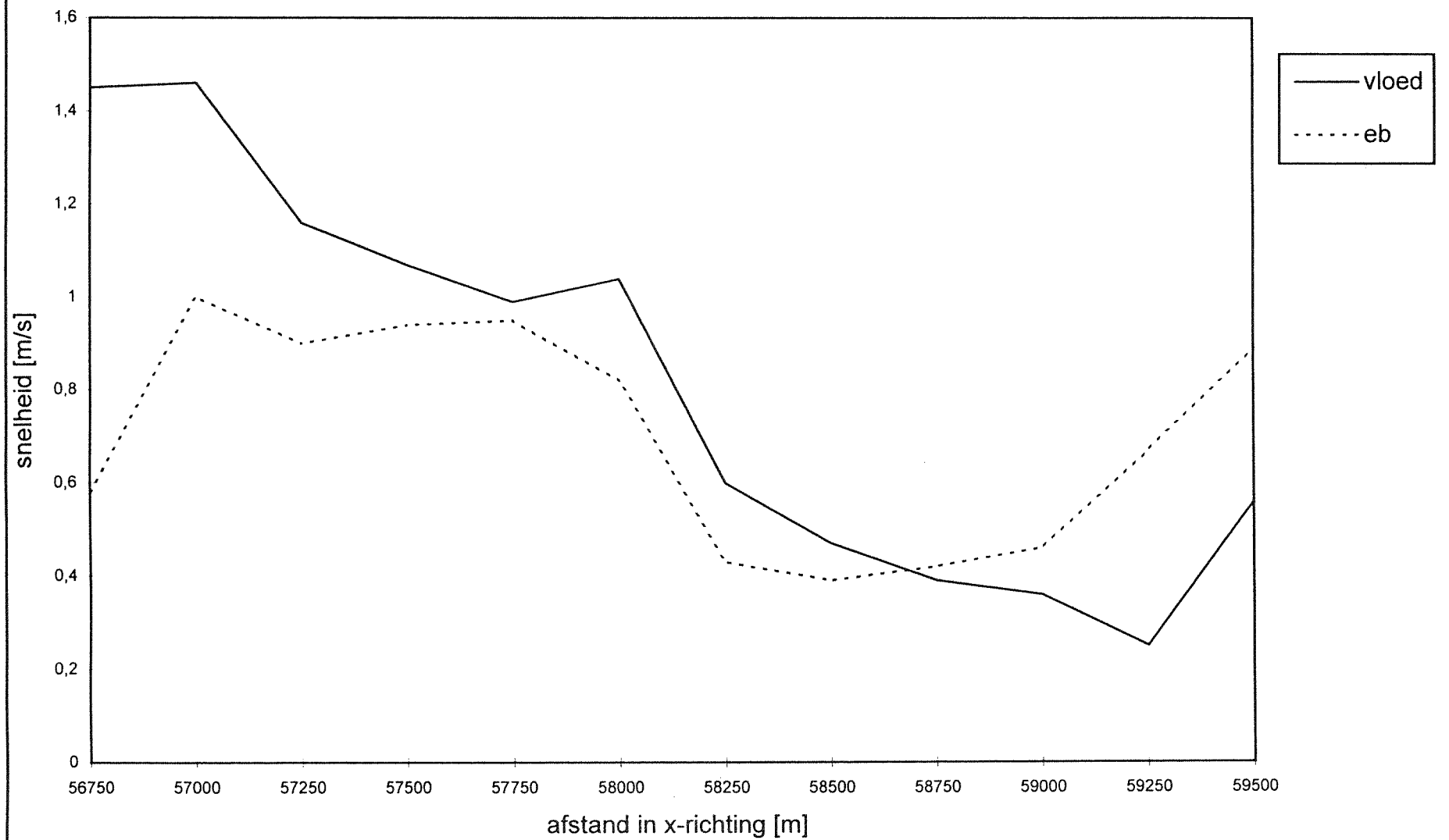
PLAAT VAN OSSENISSE max. eb- en vloedsnelheid in raai 1 SPRINGTIJ



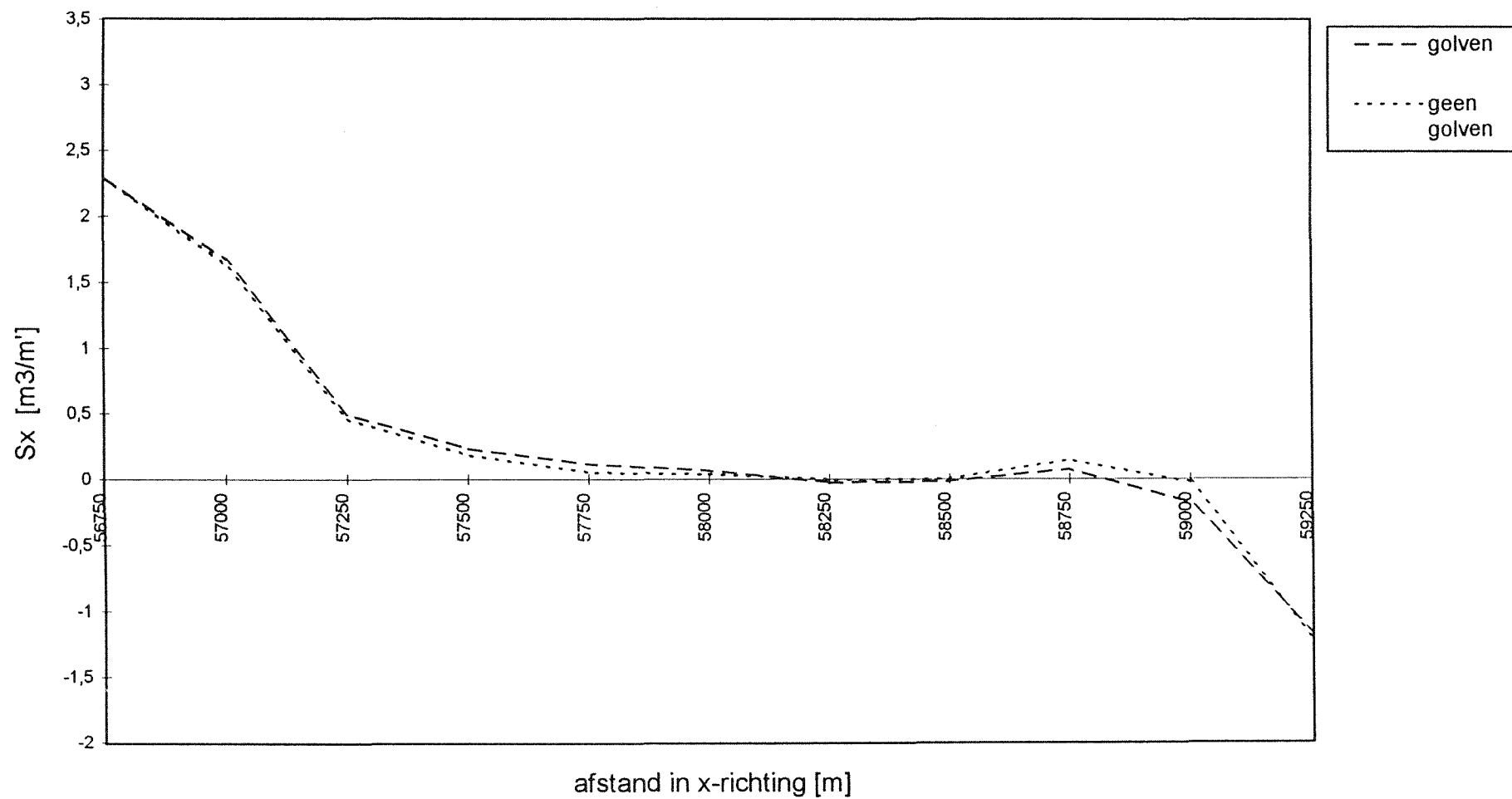
PLAAT VAN OSSENISSE max. eb- en vloedsnelheid in raai 2 SPRINGTIJ



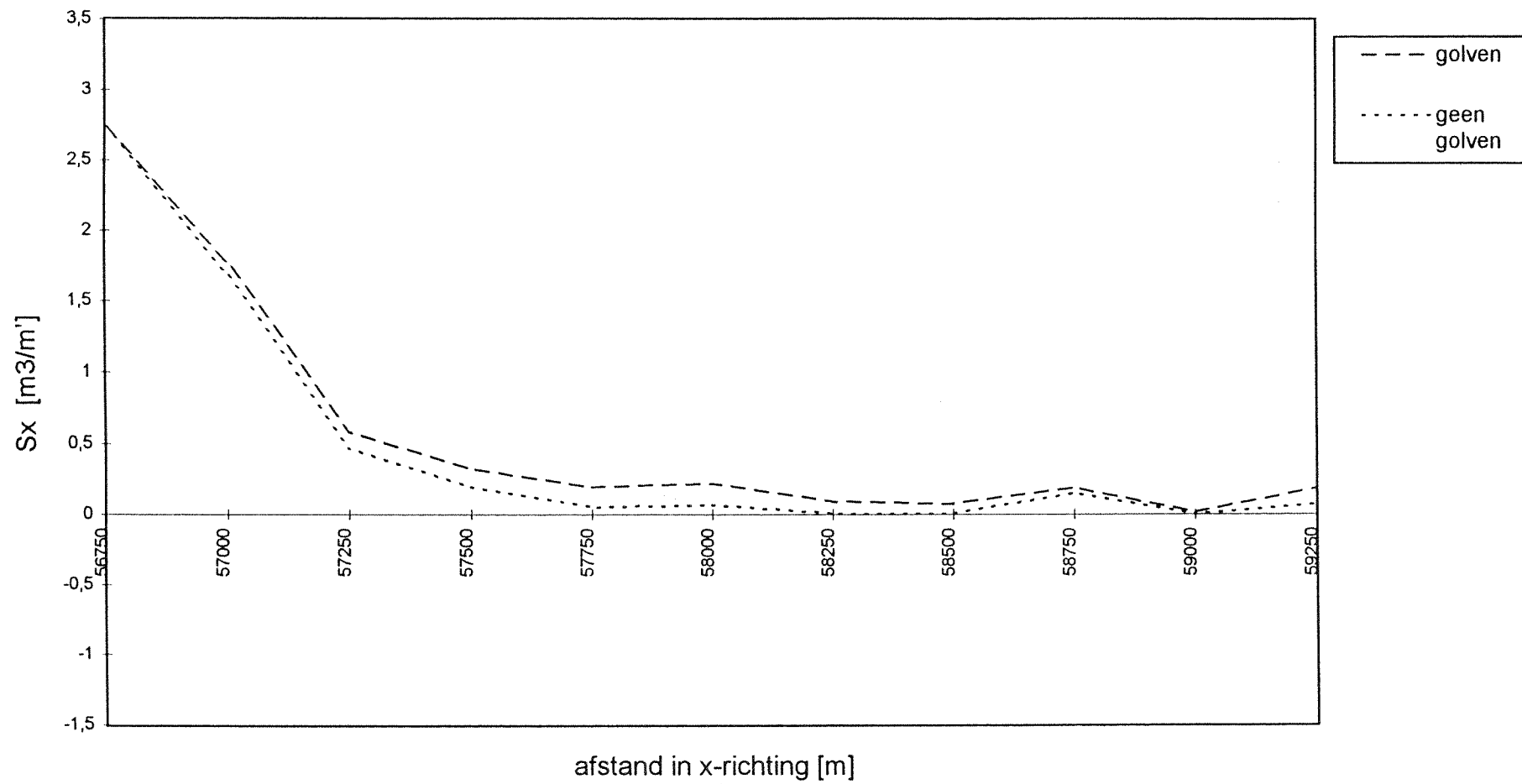
PLAAT VAN OSSENISSE max. eb- en vloedsnelheid in raai 3 SPRINGTIJ



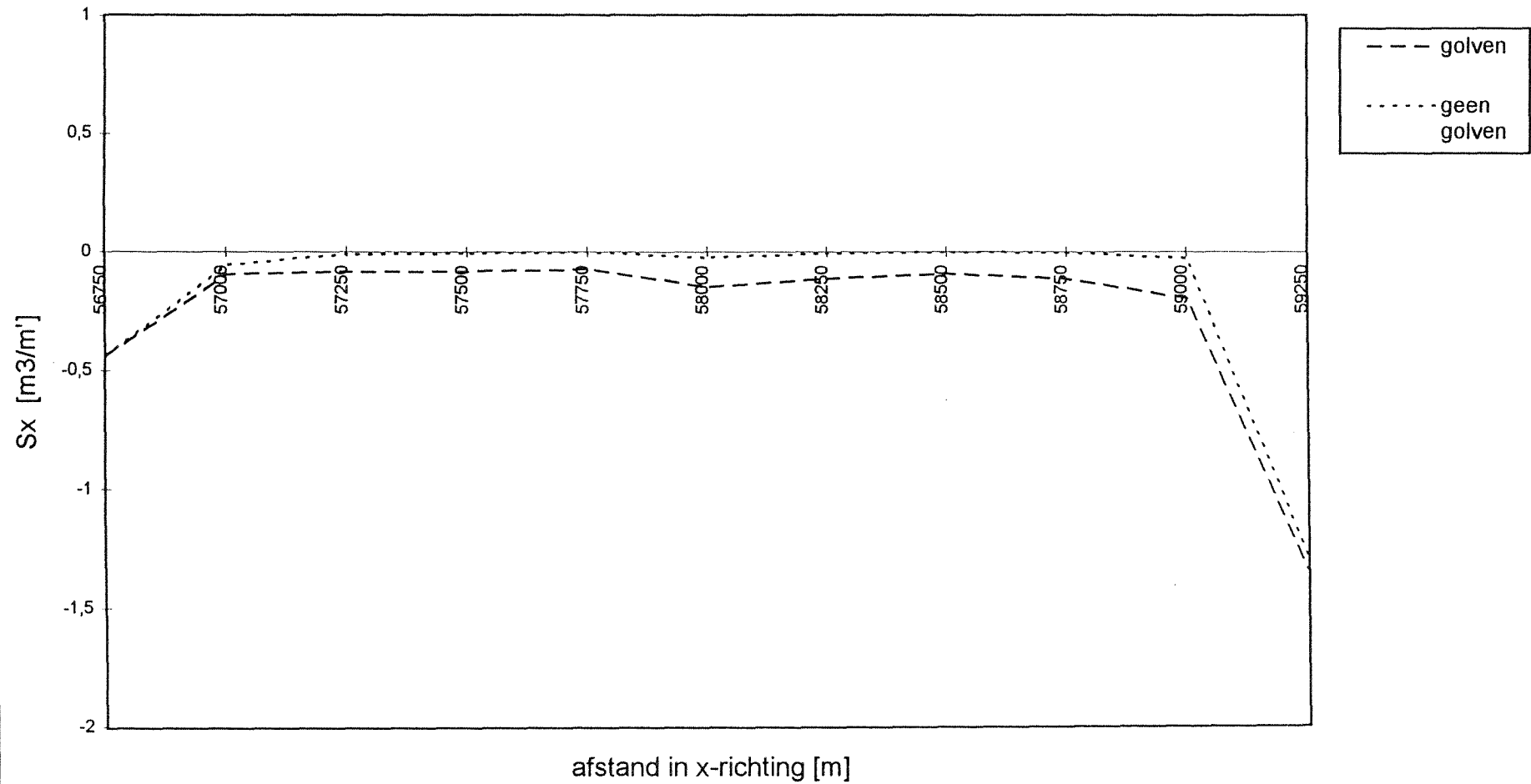
**PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: O-Z-O 8) SPRINGTIJ
resultierend sedimenttransport met en zonder golfwerking**

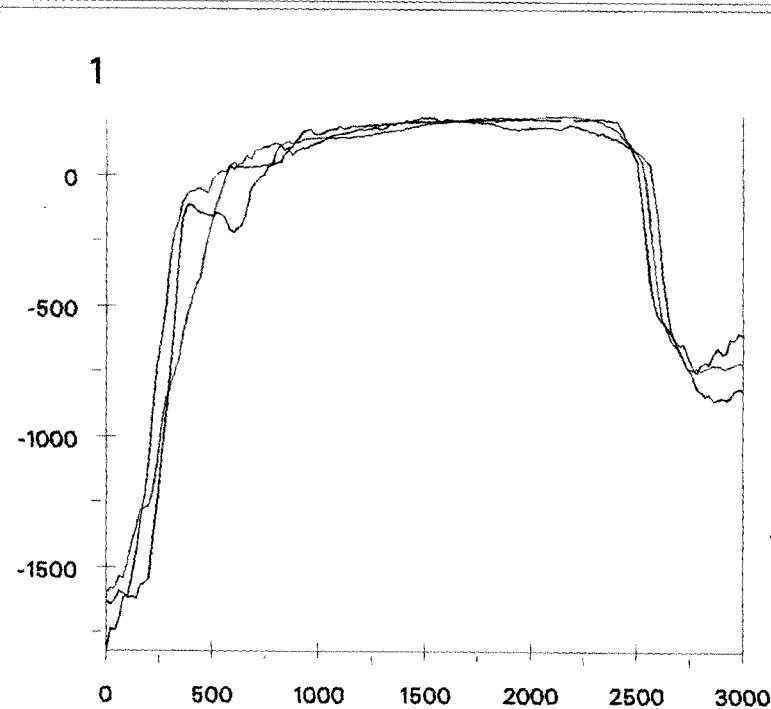
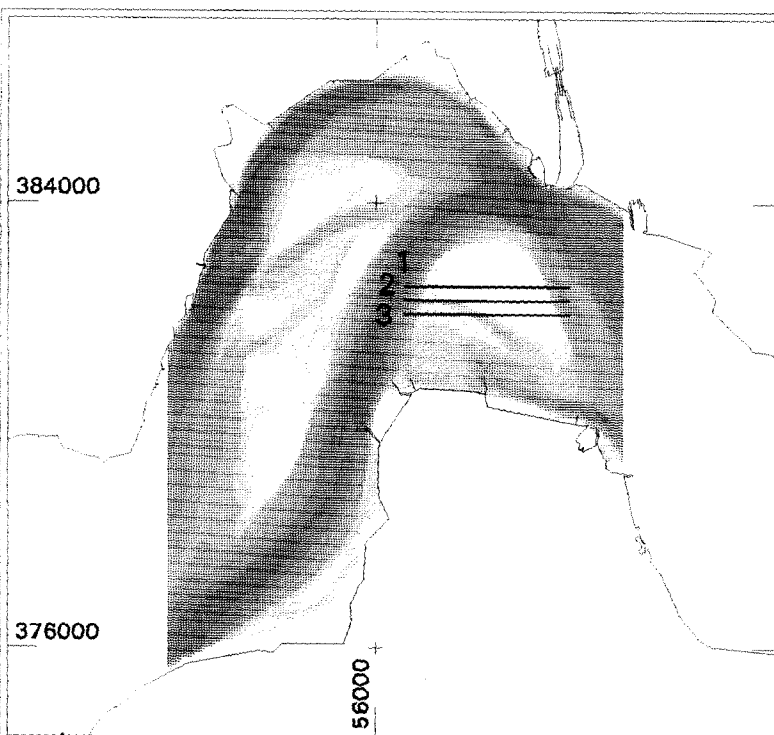





PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: O-Z-O 8) SPRINGTIJ
vloedsedimenttransport met en zonder golfwerking

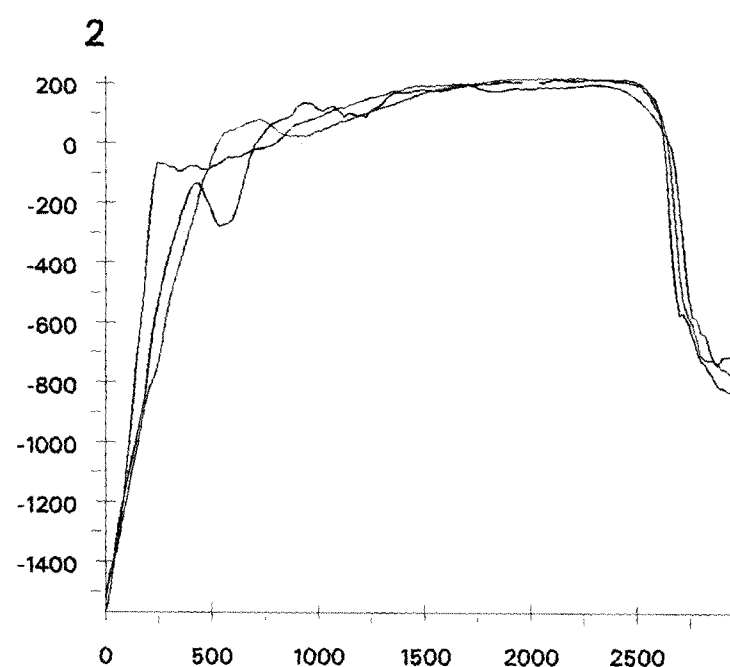
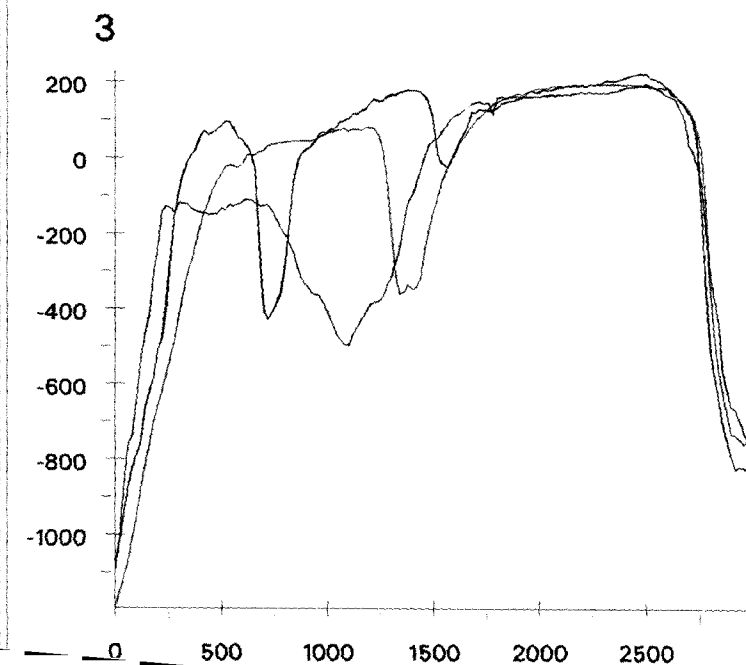


PLAAT VAN OSSENISSE RAAI 1 (wind: O-Z-O 8) SPRINGTIJ
eb sedimenttransport met en zonder golfwerking





 1986
 1990
 1995

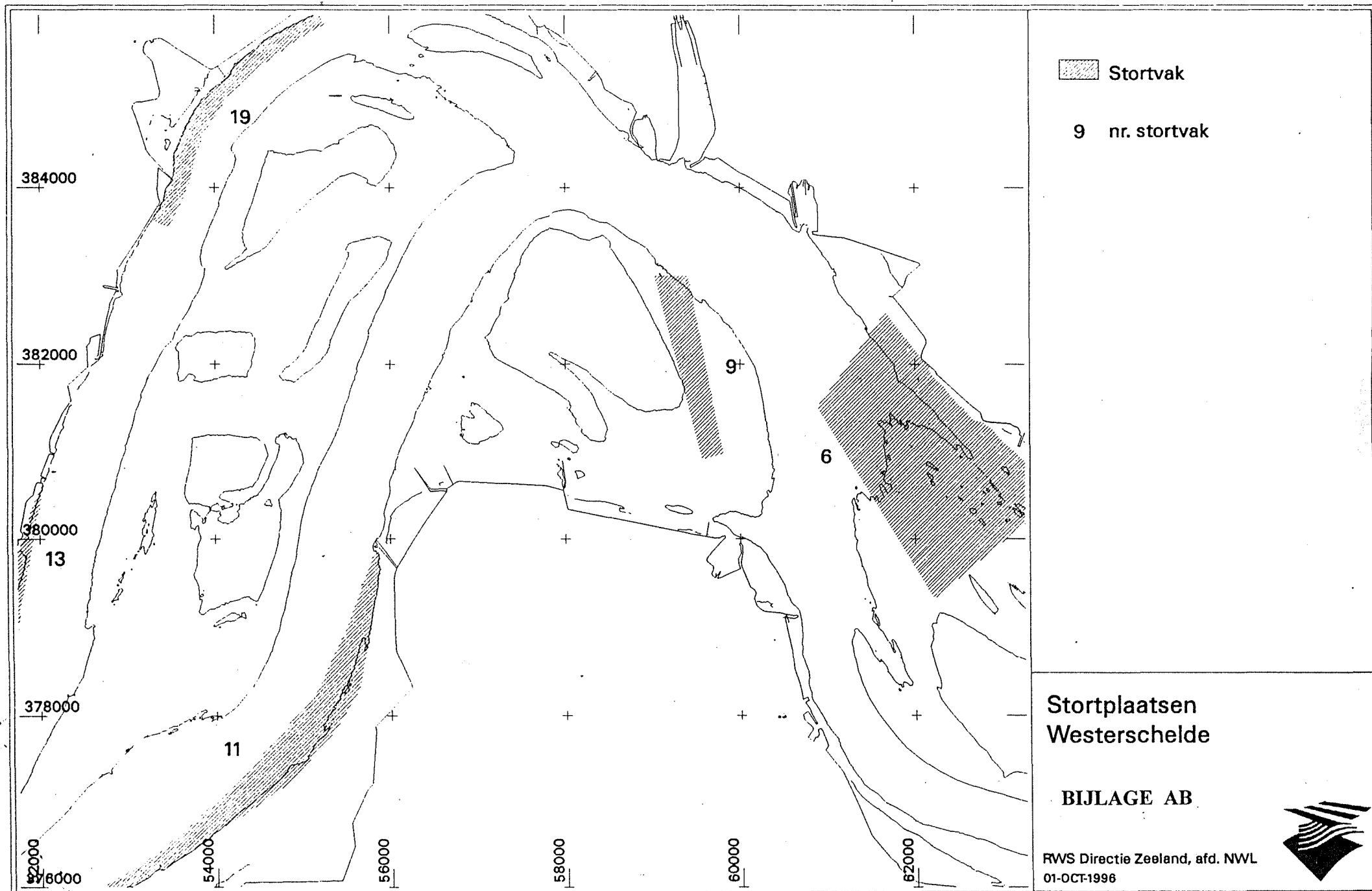


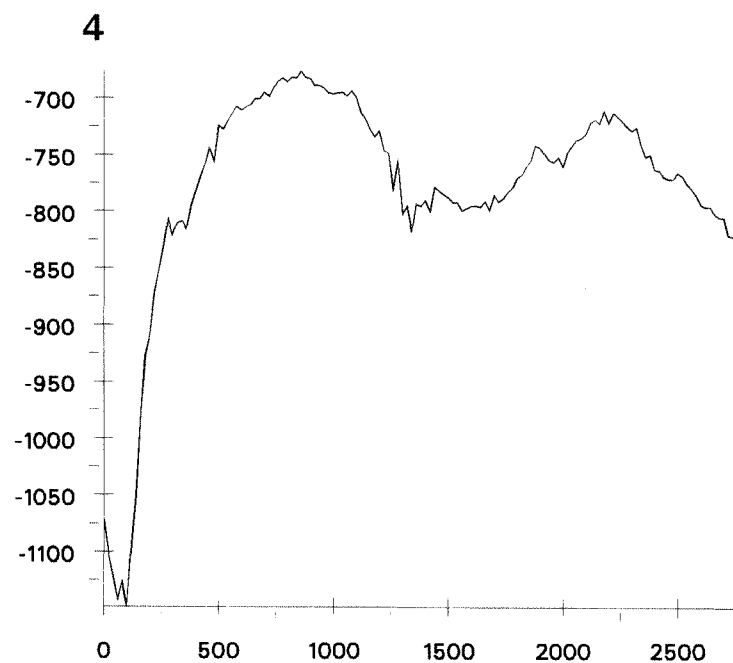
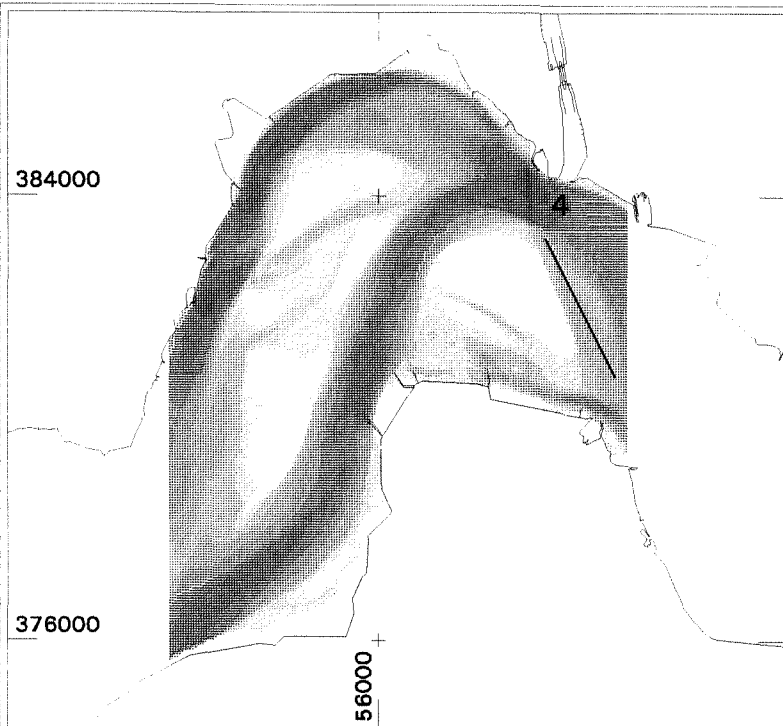
bodemprofielen
 Plaat van Ossenisse

BIJLAGE AA

RWS Directie Zeeland, afd. NWL







1988

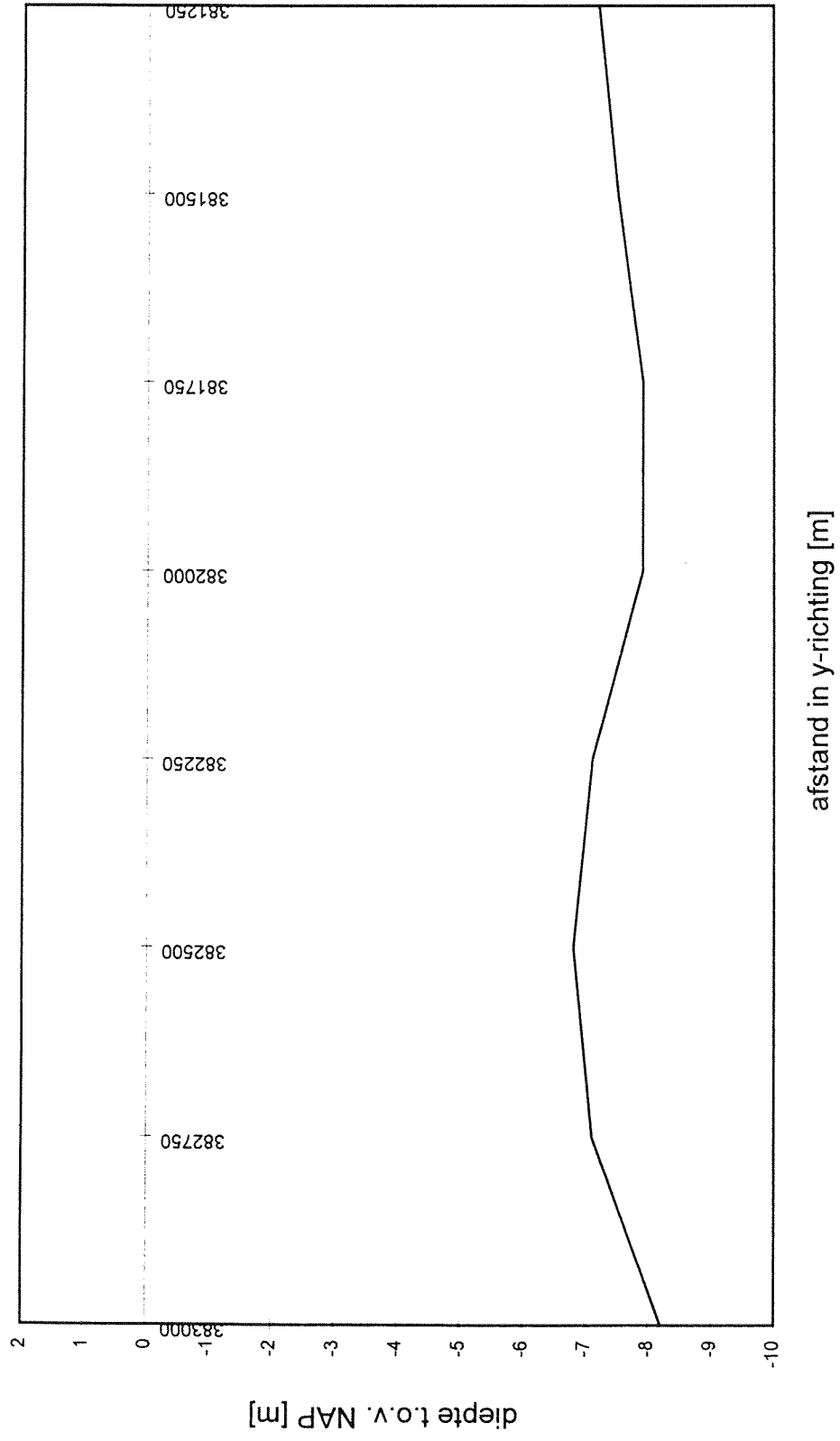
bodemprofiel
raai 4

BIJLAGE AC

RWS Directie Zeeland, afd. NWL



diepteligging RAAI 4



sedimenttransport RAAI 4 SPRINGTIJ

